



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tomi Pakkanen

SISÄISEN KONVEKTION VAIKUTUS YLÄPOHJAN LÄMMÖNERISTÄVYYTEEN

Diplomityö

Tarkastajat:
tutkimusjohtaja Juha Vinha ja
professori Ralf Lindberg
Tarkastajat ja aihe on hyväksytty
Rakennetun ympäristön
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
5. syyskuuta 2012.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PAKKANEN, TOMI: Sisäisen konvektion vaikutus yläpohjan lämmöneristävyyteen

Diplomityö, 64 sivua, 129 liitesivua

Joulukuu 2012

Pääaine: Rakennetekniikka

Tarkastajat: tutkimusjohtaja Juha Vinha (TTY) ja professori Ralf Lindberg (TTY)

Avainsanat: rakennusfysiikka, sisäinen konvektio, yläpohja, huokoinen lämmöneriste, lämmönläpäisykerroin

Viime vuosina on markkinoitu sekä valmistettu matalaenergia – ja passiivitaloja. Edellä mainitut talot perustuvat alhaiseen ulkoisen energian kulutukseen. Talolle ominaista ovat rakenteiden tiiveys, rakenteiden alhainen lämmönjohtavuus sekä talotekniikan energian säästöön ja talteenottoon tähtäävät menetelmät. Matalaenergia- sekä passiivitaloissa parannetaan rakenteiden lämmönläpäisykerrointa lämmöneristyskerroksen paksuutta kasvattamalla. Kokeellisia tutkimustuloksia tältä alueelta on vähän. Rakenteen kosteuskäyttäytyminen muuttuu eristeen paksuuden kasvaessa, koska eristekerroksen lämmönjakautuminen muuttuu. Vuoden lämpimänä aikana rakenteen tulisi toimia myös vastakkaiseen suuntaan, koska sisäilmaa joudutaan usein jäädyttämään sisäilmavaatimusten täyttymiseksi. Eristeen tehollinen lämmönjohtavuuden arvo kasvaa, kun eristeen paksuus kasvaa matalaenergia- ja passiivitalojen edellyttämiin kerrospaksuuksiin.

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella huokoisen lämmöneristeen sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen lämmönläpäisykertoimeen. Tarkastelu suoritettiin tutkimalla kokeellisella menetelmällä yläpohjan eristekerroksen lämpötilakenttiä sekä lämpövirtoja. Tutkimuksen perusteella havaittiin, että sisäinen konvektio heikentää puhalluseristeillä toteutettujen yläpohjarakenteiden lämmöneristävyyttä, kun eristyspaksuus kasvaa. Kokeellisesti määriteltä 600 mm eristepaksuuden U-arvon poikkeama oli keskimäärin tuulettamattomassa tilanteessa +11 %, laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa eristeen ulkopinnassa +18 % ja turbulenttisen ilmavirtauksen vaikuttaessa +32 %. Vastaavasti kokeellisesti määriteltä Nusseltin luku oli keskimäärin tuulettamattomassa tilanteessa 1,24; laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa 1,31 ja turbulenttisen ilmavirtauksen vaikuttaessa 1,51 kaikkien rakennekokeiden keskiarvona määriteltynä. Lämmönläpäisykertoimen määrittämisessä käytettyä materiaalin ilmanläpäisevyydestä johtuvaa lisäystä ΔU_a -arvoa tulisi koetulosten perusteella kasvattaa jopa kaksin - kolminkertaiseksi, kun lämmöneristepaksuus on 600 mm. Kokeiden perusteella tulisi käyttää yhdistelmäeristystä kuten levy- ja puhallusvilla tai diffuusioavointa ilmansulkumateriaalia 600 mm vahvuudessa huokoisessa eristekerroksessa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

PAKKANEN, TOMI: The effect of internal convection on thermal resistance of insulation in attic

Master of Science Thesis, 64 pages, 129 Appendix pages

December 2012

Major: Civil engineering

Examiners: associate professor Juha Vinha (TUT) and professor Ralf Lindberg (TUT)

Keywords: building physics, internal convection, attic, porous insulations, thermal transmittance

In recent times the construction industry has built and marketed low energy- and passive energy houses, which are based on low external energy consumption. These houses are characterized by air tightness and low thermal conductivity of building structures as well as building technologies primarily aiming at energy saving and energy recovery of HVAC-systems. In low energy and passive energy houses, the heat transfer coefficient of the building structures is improved by increasing the thickness of the thermal insulation layer. When the insulation thickness increases the humidity interaction in insulation layer changes as well, because heat distribution within the insulation layer changes. In addition, during the annual warmer periods, the building structure should by contrast function in the opposite direction, because the indoor temperature must often reduced in order to comply with the requirements for indoor temperature.

The purpose of the study was to examine the effects of internal convection in porous thermal insulation materials on thermal conductivity. The analysis was done by examining with experimental methods the temperature levels and thermal conductivity in horizontal loose-fill insulation layer. Occurrence of the internal convection in the tested materials is researched as also temperature distribution levels within the insulation layer. The results of this study indicated a decrease of thermal conductivity due the internal convection and a deviation from the definition of theoretical thermal conductivity calculations. Based on tests conducted with 600 mm insulation layers, the deviation of U-value was 11 % on average in test without air flow above, 18 % during laminar air flow on top of layer and 32 % during turbulent air flow. Respectively, the Nusselt value was on average 1,24 in in test without air flow above, 1,31 during laminar air flow and 1,51 in turbulent air flow as measured in all material tests. Based on the test results and according the finish regulation, in additional ΔU_a –value used the definition of material thermal conductivity resulting from air permeability should be increased with an insulation layer of 600 mm. In addition, based on the test results it is recommended to use complex insulation as insulation boards and loose-fill insulator or sheathing on the top of 600 mm porous insulation layers.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen diplomityönä tutkimusjohtaja Juha Vinhan, professori Ralf Lindbergin ja tutkija Jommi Suonkedon ohjauksessa.

Tutkimus on osa laajempaa FRAME –tutkimusta, jonka tarkoituksena on selvittää matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden toimivuutta sekä esittää parannuksia rakenteellisten ratkaisujen ja detaljien suunnittelun pohjaksi nyt sekä tulevaisuuden ilmastossa. Tutkimuksen rahoittajina olivat TEKES, Ympäristöministeriö ja Rakennusteollisuus ry toimialaliitot.

Haluan kiittää Juha Vinhaa työn ohjauksesta ja tarkastamisesta, Ralf Lindbergiä työn tarkastamisesta sekä Jommi Suonketoa kokeelliseen tutkimukseen liittyvästä ohjauksesta. Lisäksi esitän kiitoksen materiaalien toimittajille sekä Frame –tutkimuksen ohjausryhmälle. Lopuksi sanon nöyrän kiitoksen Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan osaston henkilökunnalle ja opiskelukavereilleni hyvästä yhteishengestä ja positiivisen ilmapiirin luomisesta tutkimuksen ympärille. Kokeen järjestämisessä tukena ovat olleet Tomi Strander, Kauko Sahi ja Petteri Huttunen.

Vaimolleni Terhille, lapsilleni Siirille ja Saimille esitän vilpittömän kiitoksen tämän projektin läpiviemisen tukemisesta. Kiitän siskoani Virpiä sekä läheisiäni saamastani kannustuksesta.

Kiitän työnantajaani Pöyry Finland Oy ja liiketoimintayksikön johtaja Heikki Solarmoa kärsivällisyydestä ja saamastani tuesta matkan varrella. Lopuksi kiitän työtovereita henkisestä tuesta ja mielenkiinnosta projektia kohtaan.

Tampereella 3.12.2012

Tomi Pakkanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen taustaa.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	2
1.4	Rajaukset	3
2.	LÄMMÖN SIIRTYMINEN	4
2.1	Johtuminen.....	4
2.2	Konvektio	6
2.3	Säteily	9
3.	YLÄPOHJAN KONVEKTIO	11
3.1	Konvektio ilmiönä.....	11
3.2	Konvektiota kuvaavat lausekkeet.....	12
4.	MATERIAALIKOKEET	16
4.1	Lämmönjohtavuus.....	16
4.2	Ilmanläpäisevyys.....	18
5.	YLÄPOHJARAKENTEIDEN KOKEET	21
5.1	Kokeiden aikataulu.....	21
5.2	Koelaitteisto	23
5.2.1	Tutkimuksen 1. osa	27
5.2.2	Tutkimuksen 2. osa	29
5.3	Koerakenteet	30
5.3.1	Tutkimuksen 1. osassa tutkitut koerakenteet.....	30
5.3.2	Tutkimuksen 2. osassa tutkitut koerakenteet.....	31
5.4	Mitatut suureet ja mittauspaikat.....	32
5.5	Koeolosuhteet	34
6.	KOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU	38
6.1	Lämpötilakentät koerakenteissa	38
6.2	Lämmönläpäisykertoimet koerakenteissa.....	45
6.3	Sisäinen konvektio koerakenteissa.....	50

7. JOHTOPÄÄTÖKSET	55
8. YHTEENVETO.....	58
LÄHTEET	61
LIITTEET.....	64

MERKINNÄT

c	painekerroin	-
d	materiaalin paksuus	m
A	pinta-ala	m^2
R	materiaalin lämmönvastus	$m^2 \cdot K/W$
R_{si}	pintavastus, sisäpinta	$m^2 \cdot K/W$
R_{se}	pintavastus, ulkopinta	$m^2 \cdot K/W$
T	lämpötila	$^{\circ}C$
T_e	ulkolämpötila	$^{\circ}C$
T_i	sisälämpötila	$^{\circ}C$
ΔT	lämpötilaero	$^{\circ}C, K$
U	lämmönläpäisykerroin	$W/(m^2 \cdot K)$
α	pinnan lämmönsiirtokerroin	$W/(m^2 \cdot K)$
λ_n	normaalinen lämmönjohtavuus	$W/(m \cdot K)$
$\lambda_{Declared}$	lämmönjohtavuus, valmistajan ilmoittama arvo ei ota huomioon materiaalin ilman läpäisevyyttä tai asennuspoikkeamia, merkitään myös λ_D	$W/(m \cdot K)$
λ_{Design}	lämmönjohtavuus, suunnittelu-arvo, merkitään myös λ_U	$W/(m \cdot K)$
ρ	tiheys	kg/m^3
Φ	lämpövirta	W
Ra_m	modifioitu Raleighin luku	-
g	putoamiskiihtyvyyden	m^2/s
β	ilman tilavuuden lämpölaajenemiskerroin	$1/K$
ν	ilman kinemaattinen viskositeetti	m^2/s
η	ilman dynaaminen viskositeetti	$N \cdot s/m^2$
c_{pa}	ilman ominaislämpökapasiteetti	$J/(kg \cdot K)$
k_a	ilmanläpäisevyys	m^2
κ_a	ilmanläpäisevyys	$m^3/(m \cdot s \cdot Pa)$
Nu	nusseltin luku, kuvaa sisäisen konvektion määrää	-

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<i>Absorboida</i>	<i>Imee itseensä, pidättää, sitoa.</i>
<i>Adheesio</i>	<i>Molekyylien tarttuminen toisiinsa.</i>
<i>Advektio</i>	<i>Vaakasuora ilmavirtaus.</i>
<i>Diffuusio</i>	<i>Kaasu- tai nestemolekyylien liikettä, jonka liikkeelle panevana voimana on kaasun tai nesteen paine-ero. Diffuusiassa kaasu tai neste virtaa korkeammasta pitoisuudesta matalamman pitoisuuden suuntaan.</i>
<i>Emissiviteetti</i>	<i>Pinnan emissiivisyys kuvaa materiaalin pinnan kykyä lähettää lämpösäteilyä. Emissiivisyyden arvo vaihtelee 0...1,0 välillä. Mustan pinnan emissiviteetti on ~0,95 ja se lähettää eniten lämpösäteilyä.</i>
<i>Emitoida</i>	<i>Lähettää, suorittaa.</i>
<i>Horisontaali</i>	<i>Vaakasuora, vaakasuuntainen.</i>
<i>Hystereesi</i>	<i>Riippuvuus aiemmista tiloista tai fysikaalisista ominaisuuksista.</i>
<i>Ilmanläpäisevyys</i>	<i>Ilmanläpäisevyys (κ_a) kuvaa ilman tilavuusvirtaa, joka stationääritilassa läpäisee kohtisuoraan pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen materiaalikerroksen. Materiaalin eri puolilla vaikuttaa yksikön suuruinen paine-ero. [$m^3/(m \cdot s \cdot Pa)$]</i>
<i>Ilmanläpäisykerroin</i>	<i>Ilmanläpäisykerroin (K) ilmaisee ilman tilavuusvirran, joka stationääritilassa läpäisee kohtisuoraan pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen materiaalikerroksen. Materiaalin eri puolilla vaikuttaa yksikön suuruinen paine-ero. [$m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$]</i>
<i>Ilmansulku</i>	<i>Rakennusosan kerros, joka estää ilmavirtauksen rakennusosan läpi.</i>
<i>Inverssi</i>	<i>Käänteisluku.</i>
<i>Johtuminen</i>	<i>Lämpöenergia siirtyy materiaalin molekyylien välityksellä lämpimästä kylmään päin.</i>

<i>Kalibrointi</i>	<i>Määritetään mittausvälineen tai -järjestelmän epätarkkuus. Kalibroinnilla tavoitellaan hyväksyttävää, laadullista ja mahdollisimman tarkkaa lopputulosta.</i>
<i>Konvektio</i>	<i>Lämpöenergia siirtyy kaasun tai nesteen paine-erojen vaikutuksesta. Paine-ero voi muodostua pakotettuna (ilman virtaus) tai sisäisenä (lämpötilaeron aiheuttaman osa-paineron vaikutuksesta).</i>
<i>Laminaarinen tila</i>	<i>Tutkimuksen kokeen 2. vaihe, jossa eristeen ulkopinnan suuntainen ilmavirtaus vaikutti suojakammion sisällä. Ilmavirtaus toteutettiin puhaltimella, joka oli kiinnitetty suojakammion seinään. Ilmavirtauksen voimakkuuden mittausarvo on esitetty taulukossa 5.5.3.</i>
<i>Lämmöneriste</i>	<i>Rakennusmateriaali, jota käytetään pääsääntöisesti ja muun käyttötarkoituksen ohella lämmöneristeenä. Rakennusmateriaalille on ominaista huokoisuus sekä verkkomainen tai kennomainen rakenne.</i>
<i>Lämmöneristys</i>	<i>Rakennusosan kerros tai kerrokset, joiden tarkoituksena on estää lämmön siirtyminen.</i>
<i>Lämmönjohtuvuus</i>	<i>Kuvaa lämpömäärää, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alan suuruisen rakenneosan, kun lämpötila-ero on yhden yksikön suuruinen.</i>
<i>Lämmönläpäisykerroin</i>	<i>Kuvaa lämpövirran, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alan suuruisen rakenneosan, kun lämpötilaero on rakenneosan molemmin puolin on yhden yksikön suuruinen.</i>
<i>Lämmönvastus</i>	<i>Ilmaisee rakennusosan tai rakenneosan lämmönsiirtymisvastuksen. Lämmönvastus R määritellään $R = \lambda [W/(m \cdot K)] / d [m]$. Lämmönvastuksen käänteisluku on lämmönläpäisykerroin U.</i>
<i>Nusseltin luku</i>	<i>Esittää johtumalla ja konvektion vaikuttaessa siirtyvän lämpöhäviötehon suhteen pelkästään johtumalla siirtyvään lämpöhäviötehoon. Kun Nusseltin luku $> 1,00$, esiintyy konvektioa.</i>
<i>Permeabiliteetti</i>	<i>Kaasun ollessa ilmaa, permeabiliteetti (k_a) kuvaa ilman tilavuusvirtaa materiaalin läpi, kun potentiaalina on ilman paineen ero. vrt. Darcyn laki. $[m^2]$</i>

<i>Reflektoida</i>	<i>Heijastaa.</i>
<i>RakMK, SRMK</i>	<i>Suomen rakentamismääräyskokoelma, ladattavissa Ympäristöministeriön www-sivuilla.</i>
<i>Stationääritila</i>	<i>Jatkuvuustila, jossa rakenteen olosuhteet ovat tasaantuneet vakioksi ja lämpövirta rakenteen läpi on vakio. Jatkuvuustilassa rakenteen lämpötilat ovat tasapainotilassa eivätkä muutu ajan suhteessa.</i>
<i>Sykli</i>	<i>Kierros, jaksottainen, säännöllisesti toistuva.</i>
<i>Säteily</i>	<i>Lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisena säteilyinä ilmassa.</i>
<i>Termometri</i>	<i>Lämpömittari.</i>
<i>Toleranssi</i>	<i>Sallittu poikkeama määrätystä arvosta, sallittu vaihteluväli.</i>
<i>Turbulenttinen tila</i>	<i>Tutkimuksen kokeen 3. vaihe, jossa eristeen ulkopintaa vastaan kohtisuoraan vaikutti ilmavirtaus suojakammion sisällä. Ilmavirtaus toteutettiin puhaltimella, joka oli kiinnitetty suojakammion kattoon. Ilmavirtauksen voimakkuuden mittausarvo on esitetty taulukossa 5.5.3.</i>
<i>Verifioida</i>	<i>Todentaa, osoittaa tai havaita todeksi.</i>
<i>Vertikaali</i>	<i>Pystysuora, pystysuuntainen.</i>

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

Tämä diplomityö on osa laajempaa Future Envelope Assemblies and HVAC solutions – tutkimusta, lyhyemmin sanottuna FRAME -tutkimusta. Tutkimuksen rahoittajina ovat TEKES, Ympäristöministeriö ja Rakennusteollisuus ry:n toimialaliitot. Tutkimus selvittää tulevaisuuden ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutusta rakennuksen rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Tutkimuksessa esitetään toimivia rakenneratkaisuja matalaenergiatalojen ja sitä tiukempia lämmöneristysvaatimuksia edellyttävälle rakenteille.

Matalaenergiatalojen markkinointi on kasvanut viime vuosina. Matalaenergiataloksi määritellään talo, jonka energian vuosikulutus on alle 60 kWh/m² Etelä-Suomessa. Vuosikulutus on noin puolet RakMK D3 (2012) mukaisen vähimmäistason saavuttavien rakennusten energiankulutuksesta. Passiivitalo on toinen ostoenergian tarvetta vähentävä rakennustyyppi. Passiivitalon lämmittämiseen tai jäähdyttämiseen ei tarvita välittömästi ostoenergiaa vaan lämmitysenergiaa syntyy välillisesti häviöenergiana laitteiden käytön yhteydessä ja ihmisen toiminnasta. Etelä-Suomessa passiivitalon energiankulutukselle asetettu tavoitearvo on 20 kWh/m² (Motiva 2011).

Matalaenergia- ja passiivitalojen energiankulutusta voidaan yhtenä osa-alueena rajoittaa rakenneratkaisuilla. Laskennallisesti rakenneosien lisäeristys RakMK D3 (2012) määrittämästä vähimmäistasosta säästää lämmitysenergiaa. Kuitenkaan tehollista lämmöneristyskerroksen paksuutta ei ole riittävästi tutkittu. Liiallisella lämmöneristämällä saattaa olla rakenteen vaurioitumista edistävä vaikutus. Kosteuden tiivistyminen lämmöneristekerrokseen on mahdollista kylmällä ja kostealla säällä sekä kesällä sisäilman jäähdytyksen vaikutuksesta. Vastaavasti eristekerroksen tulee pystyä kuivumaan. Tällöin lämmöneristemateriaalin hygroskooppisuus eli kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta voi parantaa rakenteen toimintaa. Lisäksi rakenneosan tuulettavuus tulee varmistaa. Vanhan säännön mukaisesti rakenteen ilmanläpäisevyys tulee kasvaa sisäpinnasta ulkopintaan mentäessä.

Rakennuksiin ja niiden käyttöön kuluu noin 20 % energiantuotannosta. Muita energian kuluttajia ovat muun muassa liikenne 17 % osuudella ja teollisuus 47 % osuudella (Kristillisdemokraatit ry 2011). Rakennusten energiankulutus määräytyy sekä käyttäjän tarpeen ja tapojen mukaan että suunnittelun aikana suunnitteluratkaisujen muodossa.

Rakennusmateriaalien partikkelirakenteet ovat erilaisia. Rakennushankkeen aikana on tärkeää ymmärtää, minkälaisia olosuhdevaatimuksia rakenteeseen ja rakennusosaan kohdistuu. Tutkimuksessa mukana olevat lämmöneristeet ovat avohuokoisia, hyvin ilmaa läpäiseviä. Huokoinen pienipartikkelinen materiaali on helppo levittää horisontaalirakenteisiin. Kuitenkin lämmöneristeen päätehtävä on eristävyys ja

mittarina on lämmönjohtavuus. Eristysmateriaalituottajien tulee pyrkiä parantamaan eristeen tehollista lämmöneristyskykyä. Rakennusosan lämmönläpäisykerrointa säädellään pääsääntöisesti lämmöneristeen paksuudella ja eristemateriaalin valinnalla. Eristyksen tehollinen lämmönjohtavuus ei vastaa välttämättä enää teoreettista lämmönjohtuvuutta, kun eristeen paksuutta kasvatetaan. Lämmöneristemateriaalin valintaa ohjaavat myös palotekniset ominaisuudet tai äänitekniset vaatimukset. Kokonaisuutena rakenteiden tulee luoda turvallinen ja terveellinen asumisympäristö.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Yläpohjan lämmöneristeenä puhallettava eriste on hinnaltaan kilpailukykyinen sekä helppo asentaa. Levitystapana puhalletun eristeen asennus on helppo vesikatteen ollessa usein työnaikana suojaamassa lämmöneristekerroksen asennusta. Tulevaisuudessa edellytetään parempaa energiatehokkuutta rakennuksilta Ympäristöministeriön säätäessä EU:n päästölinjauksien johdosta tiukempia lämmöneristysvaatimuksia. Lämmöneristysmääräyksiä kiristymisen perustuu myös yleismaailmalliseen näkemykseen, energiavarojen säästämiseen ja luonnonvarojen uusiutumiseen. Näistä muodostuu kestävä kehityksen –malli ja tämän periaatteen mukaisesti pyritään toimimaan.

Tässä diplomityössä tutkitaan kokeellisesti yläpohjan avohuokoisessa lämmöneristekerroksessa tapahtuvaa sisäistä konvektiota 300 mm ja 600 mm lämmöneristekerrospaksuuksilla. Tutkimuksen kirjallinen dokumentaatio ja tulokset tulevat osaksi FRAME – tutkimuksen kirjallista loppuraporttia. Tavoitteena on selvittää sisäisen konvektion tapahtuminen tutkittavissa eristemateriaaleissa ja määrittää sen vaikutus koerakenteiden lämmönläpäisykertoimeen. Koerakenteet ovat tavanomaisilla lämmöneristeillä toteutettuja.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Ennalta määrättyjä eristemateriaaleja tutkittiin empiirisen tutkimuksen keinoin. Tutkimukseen liittyi koejärjestely, jota toistettiin eri materiaaleilla. Tutkimus suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan osaston laboratoriossa. Tutkimuksen menetelmä oli laadullinen eli kvalitatiivinen tutkimus. Koejärjestelyä toistettiin tutkittavilla eristemateriaaleilla, jolloin muuttujana olivat tutkittavien lämmöneristeiden ominaisuudet. Inhimillisenä tekijänä oli eristeiden asennus koerakennusosaan. Kokeellinen tutkimus jaettiin kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tutkittiin lämpötilakenttiä eristekerroksessa ja toisessa osassa määritettiin kokeellisesti lämpövirta koerakenteiden läpi ja kokeellisia arvoja verrattiin teoreettisiin laskelmiin.

TTY:n rakennustekniikan laitoksen käytössä olevassa pakkahuoneessa voidaan mallintaa erityyppisiä olosuhteita, esimerkiksi lämpötiloja +30 °C...-20 °C, syklisiä

lämpötilan vaihteluja sekä apuvälineillä esim. kosteuden vaihtelun vaikutusta rakennusosaan eri lämpötiloissa. Tutkimusta varten rakennettiin yläpohjaa mallintava koejärjestely. Koejärjestely sijaitsi pakkahuoneessa. Lämpötiloja taltioitiin eristekerroksessa ja ulko- sekä sisäpuolella säännöllisesti termolangoilla ja puolijohdeantureilla. Laskennassa käytettäviä lämpötila-arvoja sekä lämmitystehon säätämiseen liittyviä lämpötiloja mitattiin paremman mittaustarkkuuden vuoksi puolijohde-antureilla.

Mittaustiedot konvertoitiin dataloggeriin yhteensopivalla tiedonkäsittelyohjelmalla Excel -muotoon. Tulostiedon käsittelyyn tehtiin Excel-sovellutus tutkija Jommi Suonkedon avustuksella. Liitteessä 1 olevat kuvat ovat tulosteina tästä sovellutuksesta.

1.4 Rajaukset

Tutkimuksessa keskityttiin analysoimaan avohuokoisia, yläpohjissa yleisesti käytettyjä eristeitä. Eristeiden määrä ja laatu hyväksytettiin tutkimuksen tilaajalla. Vertailuarvoiksi tehtiin tarvittavat kokeet ns. konvektiovapaalla eristeellä.

Lämpö siirtyy johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Säteilemällä siirtyvää lämpöenergiaa ei pystytty tällä koejärjestelmällä tutkimaan. Säteilyn osuus on yleensä pieni lämmöneristeen läpi kulkevassa lämpövirrassa. Lämpösäteilynä siirtynyt lämpöenergia oli mukana kokeellisessa tuloksessa koerakenteen lämmönläpäisykertoimen arvossa eikä sen osuutta pystytty selvittämään erikseen.

Faasi on aineen olomuoto. Aineella on kolme olomuotoa, kaasumainen, nestemäinen ja kiinteä. Olomuodon muutos tuottaa tai tarvitsee energiaa, ns. faasimuutosenergiaa. Nyt tehtävässä kokeessa lämpötila muutos saattoi osin johtua kosteuden faasimuutokseen ja tästä johtuen lämmöneristekerroksessa muodostui faasimuutosenergiaa. Faasimuutosilmiön tapahtumista ja siitä johtuvaa energian vapautumista tai sitoutumisesta ei voida kovinkaan helposti todeta. Tässä koejärjestelyssä ei huomioitu faasimuutosenergian vaikutusta koetuloksiin.

2. LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämpö on atomien ja molekyylien värähtelyä. Lämmön siirtyminen ilmiönä on lämpötilaeron seuraus. Jos materiaalissa tai väliaineessa ilmenee lämpötilaero, tapahtuu lämmönsiirtymistä. Kylmä ilma on tiheämpää kuin lämpimämpi ilma. Lämpö siirtyy lämpimästä kylmään päin johtumalla, konvektion tai säteilyn vaikutuksesta. Johtumisilmiö tapahtuu materiaalissa atomien välityksellä tai ilman molekyylien välillä. Lämpö siirtyy ilman tai nesteen virtauksen mukana konvektioilmiössä. Luonnollinen konvektio tapahtuu ilman lämpötilaerojen ja siitä johtuvan paine-eron aiheuttamana. Pakotettu konvektio aiheutuu taas tuulen tai puhaltimen tuottaessa paine-eroa. Kolmas lämmönsiirtymisen muoto on säteily, jossa materiaali säteilee lämpöä ilman kautta toiseen materiaaliin tai ilmaan. Säteily ei tarvitse väliainetta.

2.1 Johtuminen

Lämmön johtuessa energia siirtyy materiaalin atomi tai molekyyalitasolla värähtelyliikkeen vaikutuksesta. Johtuminen voi tapahtua kiinteässä materiaalissa tai ilmassa. Materiaali tai väliaine koostuu atomeista tai molekyyleistä. Lämmön johtuessa energia siirtyy partikkelien välityksellä lämpimästä kylmempään päin. Partikkelien energiataso on verrannollinen niiden lämpötilaan.

Lämmön siirtyminen isotrooppisessa ja homogeenisessä materiaalissa määritellään Fourier'in lain mukaisesti. Seuraava kaava esittää lämmön siirtymistä matalamman lämpötilan suuntaan. Kaavassa esiintyvään materiaalin lämmönjohtavuuden arvo on kaikille materiaaleille määriteltävissä ja yksilöllinen. Lämmönjohtavuuteen vaikuttaa materiaalin lämpötila ja kosteuspitoisuus (Hagentoft 2001).

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \Delta T = -\left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.1.1)$$

missä

λ = materiaalin lämmönjohtavuus [W/m·K]

ΔT = lämpötilaero [K]

T = lämpötila [K]

x, y, z = lämpövirran suuntakoordinaatit [m]

Materiaalin lämmönjohtavuus vaikuttaa siirtyvän lämpöenergian määrään. Yksidimensioisessa tapauksessa stationääritilassa kaavan 2.1.1 mukainen lämpövirta materiaalin läpi määritetään seuraavasti.

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1.2)$$

Kun tarkastellaan homogeenisen ja tasapaksun rakenneosan läpi johtuvaa lämpövirtaa, käytetään seuraavaa kaavaa. Lämpötilojen tulee olla vakioita rakenteen molemmiin puolin. Tällöin rakenne on jatkuvuus- eli stationääritilassa. Lämpötilat rakennusosan tai rakenneosan yli ovat lineaariset.

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{si} - T_{se}) \quad (2.1.3)$$

missä

d = rakenneosan paksuus [m]

A = materiaalin pinta-ala [m^2]

T_{si} = lämpötila rakenneosan sisäpinnassa [$^{\circ}C$, K]

T_{se} = lämpötila rakenneosan ulkopinnassa [$^{\circ}C$, K]

Kokonaislämpövirta on rakenneosan läpi siirtyvän lämpövirran ja tarkasteltavan pinta-alan tulo (kaava 2.1.4). Kokonaislämpövirtaa merkitään usein rakennusfysiikan julkaisuissa myös kirjaimella Q .

$$\Phi = q \cdot A \quad (2.1.4)$$

missä

Φ = kokonaislämpövirta [W]

q = lämpövirran tiheys [W/m^2]

A = tarkasteltavan rakenneosan pinta-ala [m^2]

Materiaalin lämmönvastus R [$m^2 \cdot K/W$] kuvaa pinta-alayksikköä kohti yhden lämpötilayksikön vaikuttaessa rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran määrää. Mitä suurempi lämmönvastuksen arvo on sitä pienempi lämpövirta siirtyy materiaalin läpi.

$$R = \frac{d}{\lambda_{Design}} \quad (2.1.5)$$

missä

d = rakenneosan paksuus [m]

λ_{Design} = materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [$W/(m \cdot K)$]

Yhtälöä 2.1.5 voidaan käyttää stationääritilassa. Pintavastuksille sekä ohuille materiaalikerroksille on määritetty lämmönvastusarvot. Kun rakenne koostuu useista rakenneosista, voidaan rakenteen kokonaislämmönvastus laskea rakenneosien lämmönvastuksien summana. Lämmönvastuksen inverssi on lämmönläpäisykerroin U_c [$W/(m^2 \cdot K)$].

$$R_T = R_{si} + \sum_{i=m}^n R + R_{se} \quad (2.1.6)$$

missä

R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus $[(m^2 \cdot K)/W]$

R_n = kunkin tasa-aineisen kerroksen lämmönvastus $[(m^2 \cdot K)/W]$

$R_{si,se}$ = sisä- ja ulkopuolen pintavastus $[(m^2 \cdot K)/W]$

Lämmönläpäisykerroin (U_c) määritetään kokonaislämmönvastuksen ala- ja yläraja-arvojen (R_T ja $R_{T'}$) keskiarvon inverssinä. (RIL225-2004 2005)

Epästationäärisessä johtumisessa rakenteen pintojen lämpötilat vaihtelevat kuten myös rakenteen läpi siirtyvä lämpövirran määrä. Lämpövirran tiheys ja lämpötilat määritetään energiataseyhtälöllä. Energian säilyvyyden lain mukaisesti varastoitu energia on yhtä suuri kuin partikkeliin tulevan lämpövirran ja siitä lähtevän lämpövirran erotus huomioiden entropia eli lämpökehitys tai lämpöhäviö.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' \quad (2.1.7)$$

missä

ρ = materiaalin tiheys $[kg/m^3]$

c_p = materiaalin ominaislämpökapasiteetti $[J/(kg \cdot K)]$

t = aika $[s]$

q' = lämmönkehitys tai lämpöhäviö $[W/m^3]$

Laskentaohjelmissa, jotka käyttävät tätä muotoa, eivät materiaaliominaisuudet huomioi lämpötilariippuvuutta aina (Vinha 2011). Lämpötilan muuttuessa materiaalin lämmönjohtavuus muuttuu. Myös materiaalin vesihöyrynläpäisevyys muuttuu suhteellisen kosteuden suhteen.

2.2 Konvektio

Kun lämpö siirtyy nesteen tai kaasun mukana, tapahtuu konvektioilmiö. Konvektio lämmönsiirrossa määritellään molekyylien diffuusion ja makroskooppisen aineensiirron eli advektion summana (Vinha 2011). Luonnollisessa konvektiossa ilman virtaus aiheutuu lämpötilaeroista johtuvista ilmanpaine-eroista. Kun lämpöä siirtävä ilmavirtaus tapahtuu ulkoisen voiman aiheuttamana, kuten tuulen, tuulettimen tai pumpun tuottamana, kyseessä on pakotettu konvektio.

Sisäistä konvektiota esiintyy rakenteissa, joissa vaikuttaa suuri lämpötilaero. Sisäinen konvektion koostuu sekä luonnollisesta että pakotetusta konvektiosta. Ilmiötä edesauttaa materiaalin suuri ilmanläpäisevyys. Savupiippuilmio on esimerkki sisäisestä konvektiosta. Tällöin terminen paine-ero muodostaa tarkastelukohdan alapuolelle alipaineen ja yläpuolelle ylipaineen. Lämmin ilma pyrkii ylöspäin saaden aikaan ilmapvirtauksen. Rakenteissa on tuuletusrakoja, joiden lämmönsiirto pinnasta ilmaan tapahtuu konvektion johdosta. Rakenteissa ja materiaaleissa tapahtuvan pakotetun konvektion aiheuttajana on usein tuulen aiheuttama ilmapvirtaus. Tuuletetussa yläpohjassa ilmapvirtaus lämmöneristeen pinnalla lisää lämmönsiirtoa eristeestä ilmaan. Tämä voidaan havaita tutkimuksen pintalämpötilaeroista.

Ulkoseinän ulkopinnan materiaalikerroksissa oleva tuuletusrako toimii rakennetta kuivattavana kanavana ulkoeristuksen toimiessa sateensuojana. Lämmön siirtyminen tuuletusraossa tapahtuu pääasiassa konvektion vaikutuksesta. Säteilyn osuus lämmön siirtymisessä vastaavassa raossa on yleensä pieni. Vaipan ulkopinnalla konvektio on pääsääntöisesti tuulen aiheuttamaa pakotettua konvektiota.

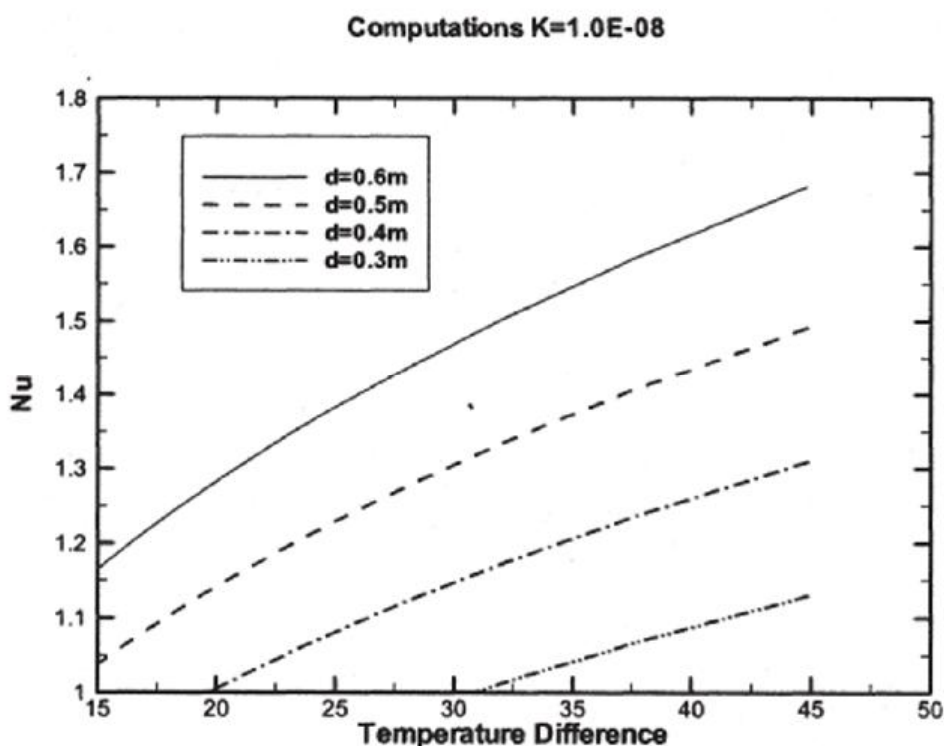
Rakenteen läpi tapahtuvaa konvektiota aiheuttaa rakenteen yli vaikuttavan lämpötilaeron sekä ilmanvaihdon ja tuulen aiheuttamat paine-erot. Konvektiota edesauttavat ilman- tai höyrysulkumateriaalissa olevat raot ja epäjatkuvuuskohdat. Rakenteen sisäistä konvektiota tapahtuu yleisimmin avohuokoisissa materiaaleissa, kun lämpötilaero rakenteen yli on suuri. Ilma alkaa virrata rakenteessa lämpimästä sisäpinnasta kylmempää ulkopintaa kohti. Toisaalla ulkopinnan jäähtynyt ilma laskeutuu lämpimään sisäpintaan, koska lämpimälle vyöhykkeelle syntyy alipainetta. Rakenteissa olevat epäideaalisuudet, kuten runkotolpat, kattotuolien alapaarteet tai ilmanvaihtoputket toimivat kylmäsiltoina ja lisäävät konvektion määrää (Wahlgren 2001).

Rakenteiden sisäinen konvektio lisää lämpövirtaa rakenteen läpi. Numeerisen tutkimuksen tuloksena ilman permeabiliteetti eristemateriaalille ja eristemateriaalin paksuus ovat merkittävimpiä vaikuttajia sisäisen konvektion esiintymiseen. (Shankar & Hagentoft 2008.) Aikaisemmin sisäinen konvektio huomioitiin materiaalien λ_n arvoissa. Voimassa olevan RakMK C4 (2012) mukaan sisäisen konvektion huomioimiseksi on annettu määräykset kappaleessa ”2.4 Luonnollinen konvektio lämmöneristyksessä”. Kappaleessa edellytetään laskemaan modifioitu Rayleighin luku lämmöneristeelle. Edm. luku tulee olla alle määritettyjen raja-arvojen vaaka- ja pystyrakenteissa. Mikäli raja-arvot ylittyvät, tulee sisäistä konvektiota hallita rakenteellisin toimenpitein tai vaihtaa eriste kokonaisuudessaan tai osittain vähemmän ilmaa läpäisevään eristeeseen (RakMK C4 2012). Raja-arvot ovat esitetty luvussa 6.3.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu sisäisen konvektion vaikuttavan lämmöneristeen lämmönvastuksen määrään heikentävästi. Seinärakenteen mineraalivillan 200 mm eristeen tehollisen lämmöneristyspaksuuden on todettu olevan

noin 88 % ja 300 mm eristeen vastaavasti 83 % kokonaispaksuudesta (Kokko et al. 1997).

Ruotsissa Chalmerin yliopistossa on tutkittu laskennallisesti mineraalivillaeristeen, puhalletun mineraalivillaeristeen ja polystyreenipalloeristeen sisäistä konvektiota yläpohjarakenteessa. Tutkimuksessa havaittiin konvektion alkavan puhalletussa mineraalivillaeristekerroksessa, kun eristepaksuus ylittää 300 mm lämpötilaeron ollessa 35 °C. Vastaavasti laskennallisesti sisäinen konvektio alkaa 500 mm mineraalivillakerroksessa, kun lämpötilaero eristeen yli saavuttaa 15 °C.



Kuva 2.2.1. Lämpötilaeron vaikutus Nusseltin lukuun huokoisessa vaakasuuntaisessa eristyksessä. Lämmöneristemateriaalin ilmanläpäisevyys oli $5,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m s Pa})$ kuvassa esitetyssä tarkastelussa (Shankar & Hagentoft. 2008. A Numerical study of Effect of natural convection on thermal properties on horizontal oriented porous insulation. Chalmers University of technology. 11 s.)

Yllä oleva kuva 2.2.1 esittää huokoisen mineraalivillalämmöneristeen konvektiota Nusseltin luvun ja lämpötilaeron suhteena. Kuvaa tulkitsemalla voidaan todeta konvektion lisäävän lämpövirtaa 400 mm lämmöneristekerroksen läpi noin 20 %, kun lämpötilaero on 35 °C. Kun lämmöneristekerroksen paksuus on 600 mm, konvektion osuus lisää lämpövirtaa 55 %:iin edellä mainitun lämpötilaeron vaikuttaessa lämmöneristekerroksen ylitse.

Sisäisen konvektion tapahtumista ja suuruutta voidaan arvioida laskennallisesti modifioitujen Rayleighin luvun (Ra_m) perusteella. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti,

materiaalin paksuus sekä tiheys ja lämpötilaero materiaalin yli vaikuttavat pääasiassa modifioitun Rayleighin luvun arvoon. Kaava on esitetty tarkemmin kohdassa 3.2.

Kuvan 2.2.1 mukaan todetaan luonnollisen konvektion heikentävän mineraalivillaeristeen lämmöneristyskykyä. Ohjeen ”RIL225-2004. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta” (2005) mukaan lämmöneristeen ilmanläpäisevyys otetaan huomioon korjauskertoimella ΔU_a sekä pysty- ja vaakasuoralle että vinolle eristekerrokselle. Tämä kerroin kuvaa sisäisen konvektion heikentävää vaikutusta eristekerroksessa. Kun lämmöneristepaksuudet kasvavat, ei tämän tyyppinen likimääräinen kerroin kuvaa tarpeeksi sisäisen konvektion heikentävää osuutta eristekerroksessa. Vakiokerroin ei kuvaa konvektiota, jonka vaikutus riippuu eristeen paksuudesta ja ilmanläpäisevyydestä. Konvektion vaikutus tulee kuitenkin ottaa huomioon rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa.

2.3 Säteily

Lämpöenergian kolmas siirtymismekanismi on säteily. Lämpöenergia säteilee sähkömagneettisina aaltolina kahden eri lämpötilassa olevan materiaalin välillä. Kun materiaalin lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, materiaali lähettää säteilyä ympäristöönsä. Lämpösäteily ei tarvitse väliainetta ja on tehokkainta tyhjiössä. Väliaine saattaa kuitenkin hidastaa säteilyä ja vähentää säteilyn tehoa.

Lämpösäteily tapahtuu $8^{-1} \dots 10^2 \mu\text{m}$ aallonpituusalueella. Tällä alueella näkyvän valon aallonpituus on $0,4 \dots 0,7 \mu\text{m}$. Säteily jaetaan pitkäaaltoiseen tai lyhytaaltoiseen lämpösäteilyyn. Auringon säteily on lyhytaaltoista samoin kuin pilvistä ja ilmakehästä heijastuva diffuusi lämmönsäteily. Maan pinta ja rakennukset reflektioivat diffuusia säteilyä, joka on pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Pintojen emittoima lämpösäteily on huonelämpötila-alueella pitkäaaltoista lämpösäteilyä (Bejan 1984).

Lämpösäteilyn teho määritetään seuraavien kaavojen mukaisesti (Mizohata et al. 2010, Vinha 2011):

$$P = E \cdot A \quad (2.3.1)$$

missä

P = kappaleen emittoiman lämpösäteilyn teho [W/m^2]

E = pinnan säteilyvoimakkuus [W]

A = kappaleen pinnan pinta-ala [m^2]

Emissiviteetti, ε [-], on kappaleen pinnan kyky lähettää pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Pintojen emissiviteetin arvot ovat 0...1 välillä. Parhaiten säteilyä emitoi musta pinta, jonka $\varepsilon \sim 0,95$. Säteilyteho voidaan määrittää Stefan-BolzmANNin lain avulla.

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.3.2)$$

missä

E_b = ideaalisen mustan pinnan säteilyteho [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^3)$]

σ = Stefan BolzmANNin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]

T = termodynaaminen (absoluuttinen) lämpötila [K]

Kappaleen pinnan säteilytehon E ja mustan kappaleen pinnan emitoidun säteilyn E_b suhdetta kutsutaan kappaleen emissiviteetiksi.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.3.3)$$

missä

ε = kappaleen pinnan emissiviteetti [-]

σ = Stefan BolzmANNin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]

T = termodynaaminen (absoluuttinen) lämpötila [K]

Emissiviteettiin vaikuttaa säteilyn aallonpituus sekä lähtökulma. Rakennusmateriaalien emissiviteetti on usein riippumaton pinnan kappaleen väristä. Pintaan osuvasta säteilystä osa heijastuu, osa absorboituu ja joillakin materiaaleilla lyhytaaltoinen lämpösäteily kulkee materiaalin läpi. Säteilykomponenteista käytetään seuraavia nimiä ja niiden summa on 1,0 (Hagentoft 2001).

ρ = kappaleen pinnan heijastuskerroin [-]

τ = kappaleen pinnan läpäisykerroin [-]

α = kappaleen pinnan absorptiokerroin [-]

Lyhyt- ja pitkäaaltoisen säteilyn absorptio- ja heijastuskerroin ovat erisuuruisia. Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin on pienempi ja heijastuskerroin on suurempi vaaleilla pinnoilla. Läpäisykerrointa tarvitaan harvoin, koska suurin osa rakennusmateriaaleista ei läpäise lämpösäteilyä. Lasi on lyhytaaltoista lämpösäteilyä läpäisevä materiaali.

3. YLÄPOHJAN KONVEKTIO

Yläpohjan rakenne on tasakattoisessa rakennuksessa alipainetuulettimilla tuulettuva, kuormitetussa yläpohjassa käännetty, suljettu, katto tai ullakollinen tuulettuva yläpohja. Tasakattoisessa rakennuksessa lämmöneriste muodostuu useista horisontaalikerroksista. Lähellä eristeen ulkopintaa on tuuletusurilla varustettu eristemateriaali. Urat johtavat tuuletusilmaa alipainetuulettimille kokoajaurien kautta. Käännetty katto rakennetaan pääsääntöisesti kuormitusta kestävästä konvektiovapaasta eristeestä, kuten XPS-eristeestä. Ullakollinen, tuulettuva yläpohja eristetään usein puhallettavalla puukuitu-, lasipuhallus- tai puhallettavalla mineraalivillaeristeellä. Osastoivassa yläpohjan rakenteessa eristekerroksen alin kerros on levyvillaeristettä, joka kantaa päällä olevan huokoisen eristyksen palotilanteessa.

Lämpö voi siirtyä lämmöneristekerroksessa ilmavirtauksen mukana. Sisäinen ilman virtaus johtuu eri lämpötilassa olevan ilman paine-erosta. Pakotettu konvektio tapahtuu ulkoisen ilmavirtauksen vaikutuksesta. Ilmavirtausta edesauttaa eristemateriaalin huolimaton asennus. Tämä saattaa toimia alulle panevana voimana homeen kasvulle yläpohjarakenteessa.

3.1 Konvektio ilmiönä

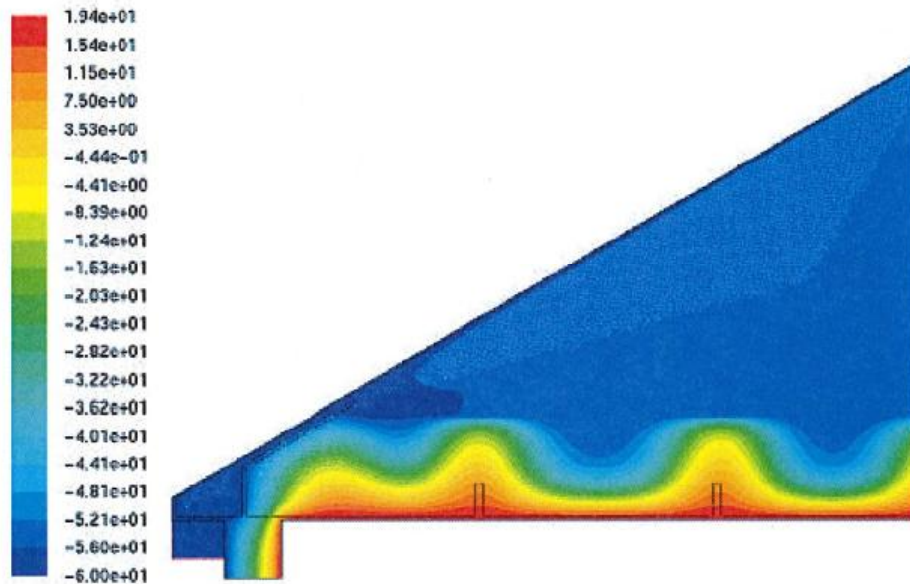
Lämmön siirtyessä konvektion vaikuttaessa tapahtuu nesteen tai ilman virtausta suuremmasta osapaineesta pienemmän suuntaan. Ilman osapaine riippuu ilman lämpötilasta. Kun sisällä on +20 °C ja ulkona -20 °C, lämpötilaero eristeen yli on lähes 40 °C ilmanpaine-eron ollessa noin 0,5 - 1 Pa. Pintaverhouksen vaikutus lämpötilaeroon on usein marginaalinen.

Konvektioilmiö tapahtuu avohuokoisissa materiaaleissa. Suomessa käytetään yläpohjan eristeenä lähes yksinomaan puhallettavia eristeitä joko pelkästään tai paloturvallisuuteen liittyen levymäisen eristeen kanssa. Lämmöneristespaksuuden kasvaessa, kasvaa etenkin kylmään vuodenaikaan eristekerroksen yli vaikuttava lämpötilaero. Lämpötilaero toimii sisäisen konvektion voimakkuuden osoittimena, kuten laskennallisesta tarkastelusta voidaan todeta (Shankar & Hagentoft 2008, Wahlgren 2006).

Kokeellisessa osuudessa saatujen tulosten perusteella voidaan todeta sisäisen konvektion vaikutuksen lämmöneristeen lämmönvastukseen olevan suurempi 600 mm eristekerroksella kuin 300 mm kerrospaksuudella vastaavalla lämmöneristemateriaalilla ja samalla tiheydellä toteutetulla eristekerroksella.

Rakennesuunnittelutehtävissä rakenteiden lämmönläpäisykerrointa määrittäessä ei usein erityisesti kiinnitetä huomiota rakennusmateriaalin lopulliseen toimintaan vaan saatetaan suorittaa rakennetyypin valinta valmistajan esittämän tyyppiratkaisun

mukaisesti. Rakennusosan epäjatkuvuutta kuvaaviin kohtiin kuten ilmanvaihtoputkiin ja kattotuolin alapaarteisiin tai pistemäisiin lämmönlähteisiin kuten valaisimiin ei kiinnitetä erityistä huomiota perussuunnittelua tehtäessä eikä tämän tyyppiseen tarkasteluun ole soveltuvia työvälineitä. Edellä mainitut lämmönlähteet rakennusosassa edesauttavat konvektion syntymistä ja ylläpitävät tätä. Sisäisen konvektion vaikutus rakenteen eristekerroksen lämmönjohtavuuteen tulee ottaa huomioon materiaalin lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvossa.



Kuva 3.1.1 Lämpötilan jakauma konvektion vaikuttaessa yläpohjan eristeessä. (Ciucasu et al. 2005).

Kuvasta 3.1.1 on havaittavissa eristekerroksen epäjatkuvuuskohtien vaikutus lämpötilan jakaantumiseen. Kuva 3.1.1 liittyy laskennalliseen tutkimukseen, jossa oli yläpohjan eristeenä 500 mm huokoista mineraalivillaa. Lähteen Ciucasu et al (2005) mukaan rakenteet mallinnettiin sekä lasi- että kivivillalla. Eristeiden tiheydet olivat 15 - 30 kg/m³ ja permeabiliteetti vaihteli $3,9 - 9,0 \cdot 10^{-9}$ m² välillä. Seinälinjalla oli tuulenohjain vesikatteen kannattajien alapinnassa. Sisäilman lämpötila oli +20 °C ja ulkoilman lämpötila aleni 0 °C ...-80 °C. Tutkimuksen mukaan kriittinen ulkoilman lämpötila sisäisen konvektion alkaessa oli -40 °C ...-70 °C välillä riippuen eristemateriaalista. Tutkimustulokset erosivat edellä esitetystä Shankar & Hagentoft (2008) tuloksista, joissa luonnollista konvektiota esiintyi huomattavasti pienemmällä lämpötilaerolla.

3.2 Konvektiota kuvaavat lausekkeet

Konvektio tapahtuu pakotettuna tai luonnollisena konvektiona. Pakotettu konvektio tapahtuu tuulen paineen tai ilmanvaihtokoneen vaikutuksesta. Tällöin rakenteen yli vaikuttava paine-ero tapahtuu ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Luonnollinen

konvektio tapahtuu lämpötilaerojen vaikutuksesta eli paine-erojen aiheuttamana ilmavirtauksena. Pakotettua ja luonnollista konvektiota kuvaavat välillisesti ja välittömästi seuraavat termit.

Newtonin lain avulla voidaan laskea lämpövirran tiheys materiaalin pinnasta (Hagentoft 2011).

$$q_{\text{conv}} = \alpha_{\text{conv}} \cdot (T_s - T_a) \quad (3.2.1)$$

missä

q_{conv} = konvektion aiheuttama lämpövirta [W/m^2]

α_{conv} = konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

T_s, T_a = lämpötilaero materiaalin pinnasta ympäröivään ilmaan [$^{\circ}\text{C}, \text{K}$]

Prandtlin luku ilmoittaa virtaavan aineen nopeus- ja lämpötilarajakerrosta säätelevien ominaisuuksien suhteen (Vinha 2011).

$$P_r = \frac{c_{pa} \cdot \eta_a}{\lambda_a} \quad (3.2.2)$$

missä

c_{pa} = ilman ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

η_a = ilman dynaaminen viskositeetti [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]

λ_a = ilman lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

Grashofin luku kuvaa sisäisen konvektion nostevoimien ja viskoottisten kitkavoimien suhteen. Luvusta voidaan päätellä myös, onko konvektion virtaus laminaarista vai turbulenttista. Prandtlin ja Grashofin lukujen tulo on Rayleighin luku. Nusseltin luku on Prandtlin ja Grashofin lukujen korrelaatio sisäisessä konvektiossa (Vinha 2011, Jahkonen 2009).

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho_a^2 \cdot \Delta T \cdot L^3}{\eta_a^2} \quad (3.2.3)$$

missä

g = putoamiskiihtyvyys [m/s^2]

β = ilman lämpölaajenemiskerroin [$1/\text{K}$]

ρ_a = ilman tilavuuspaino [kg/m^3]

ΔT = lämpötilaero [K]

L = karakteristinen [m]

η_a = ilman dynaaminen viskositeetti [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]

Reynoldsin luku kuvaa ilmavirtauksen tyyppiä. Ilmavirtaus saattaa olla laminaarista tai turbulenttista. Tasopinnalla ilmavirtaus on turbulenttista, kun Reynoldsin luku on suurempi kuin $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^6$ (Vinha 2011).

$$R_e = \frac{v_s \cdot L}{v_a} \quad (3.2.4)$$

missä

v_s = ilmavirtauksen nopeus [m/s]

L = karakteristinen pituus [m]

v_a = ilman kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

Nusseltin luku kuvaa lämmön siirtymisen lisääntymistä materiaalikerroksessa. Yksinkertaistettuna Nusseltin luku on konvektion vaikuttaessa lämpövuon rakenteen läpi suhteessa johtumalla tapahtuvaan lämpövuohon rakenteen läpi. Kun konvektiota ei esiinny, Nusseltin luku on pienempi tai yhtä suuri kuin 1,0.

$$Nu = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} - \rho \cdot c \cdot VT \right) dx}{\frac{-k \cdot \Delta T}{d}} \quad (3.2.5)$$

Nusseltin luku on lähtökohtaisesti modifioidun Rayleighin luvun funktio (Shankar & Hagentoft 2000).

Rayleighin luku otettiin käyttöön, koska useissa sisäisen konvektion tarkasteluissa esiintyi Gr ja Pr. Kuitenkin nykyisin lämpötilaerosta johtuvaa sisäistä konvektiota ja sen esiintymistä sekä voimakkuutta kuvataan modifioidun Rayleighin luvun avulla.

$$Ra_m = \frac{\rho_a \cdot c_{pa} \cdot g \cdot \beta \cdot d \cdot k_a \cdot (T^+ - T^-)}{v_a \cdot \lambda} \quad (3.2.6)$$

missä

c_{pa} = materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)]

ρ_a = materiaalin tiheys [kg/m^3]

g = putoamiskiihtyvyys [m/s^2]

β = lämpölaajenemiskerroin [$1/K$]

d = paksuus [m]

k_a = materiaalin permeabiliteetti ilmalle [m^2]

v_a = ilman kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

λ = lämmönjohtavuuden arvo [$W/(m^2 \cdot K)$]

Modifioidun Rayleighin luvun arvoon vaikuttavat lämpötilaero materiaalin yli, materiaalin tiheys sekä ilmanläpäisevyys ja materiaalikerroksen paksuus. Muut arvot ovat vakio-arvoja tai niiden vaikutus ei ole merkittävä tavanomaisessa tarkastelussa. Ilman ominaislämpökapasiteetti riippuu lämpötilasta. Kokeessa olevalla lämpötila-alueella ominaislämpökapasiteetin muutos lämpötilan suhteen on pieni, joten laskelmissa voidaan käyttää vakioarvoa (Aittomäki 2009).

Kaava 3.2.6 sievenee alla olevan muotoon ilman ominaisuuksien osalta. Ilman ominaislämpökapasiteetti, putoamiskiihtyvyys, ilman tilavuuden lämpölaajenemiskerroin sekä ilman kinemaattinen viskositeetti ovat lähes vakioita. Ilman kinemaattinen viskositeetti on ilman dynaamisen viskositeetin ja ilman tiheyden osamäärä. Ilman tiheys on muuttuva, lämpötilasta riippuva suure.

$$Ra_m = 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{d \cdot k_a \cdot (T^+ - T^-)}{\lambda} \quad (3.2.7)$$

Usein materiaalivalmistajat ilmoittavat tuotteen ilmanläpäisevyyden κ_a , jonka yksikkönä on $[m^3/(m \cdot s \cdot Pa)]$. Yksikön muunnos tehdään seuraavalla kaavalla (RIL225-2004, 2005).

$$k_a = \kappa_a \cdot \eta \quad (3.2.8)$$

missä

k_a = materiaalin permeabiliteetti ilmalle $[m^2]$

κ_a = ilmanläpäisevyys $[m^3/(m \cdot s \cdot Pa)]$

η = ilman dynaaminen viskositeetti vakio lämpötilassa $[N \cdot s/m^2]$

Ilman dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti ovat lämpötilariippuvia suureita.

Lämmön siirtyminen huokoisessa materiaalissa tapahtuu usein johtumisen ja sisäisen konvektion yhdistelmänä. Sisäisen konvektion ja johtumisen aiheuttamaa lämpövirtaa lämmöneristeen läpi stationääritilassa kuvataan seuraavalla kaavalla (Hagentoft 2001):

$$Q_{cd+conv} = -A \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dx} + c_{pa} \cdot M_a \cdot \Delta T \quad (3.2.9)$$

missä

A = materiaalin pinta-ala $[m^2]$

λ = materiaalin lämmönjohtavuus $[W/m \cdot K]$

T = lämpötila $[K]$

x = lämpövirran suuntakoordinaatit $[m]$

c_{pa} = materiaalin ominaislämpökapasiteetti $[J/(kg \cdot K)]$

M_a = ilman massavirta $[kg/s]$

ΔT = lämpötilaero $[K]$

4. MATERIAALIKOKEET

Tutkimuksessa mitattiin aluksi koerakenteissa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuus, ilmanläpäisevyys ja tiheys. Mitatut arvot vastasivat suuruusluokaltaan valmistajien esittämiä arvoja. Tutkimuksen lämmöneristekokeiden tulosten analysoinnissa käytettiin mitattuja materiaaliominaisuuksia.

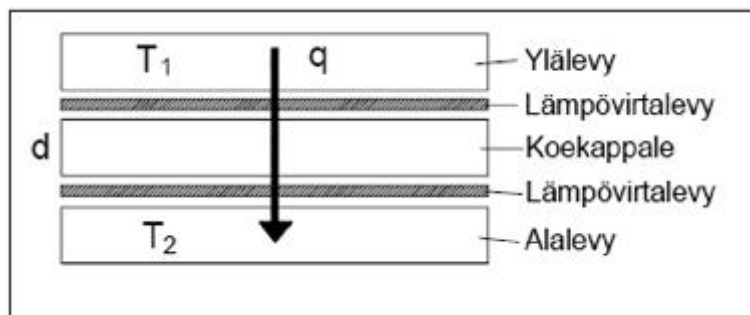
Sisäisen konvektion esiintymisen kannalta oleellinen materiaaliominaisuus oli ilmanläpäisevyys. Ilmanläpäisevyyden mittaaminen suoritettiin standardin ISO 9053 mukaisesti.

Materiaalien lämmönjohtavuudet olivat perustana rakenteen lämmönläpäisykertoimen määrittämiselle. Materiaalin lämmönjohtavuudet määntyivät mittauslämpötilan, materiaalin kosteuspitoisuuden ja tiheyden mukaan. Lämmönjohtavuuden mittaaminen suoritettiin standardin ISO8301 mukaisesti. Tutkittavien lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden määrittäminen tapahtui LaserComp FOX304 lämpövirtalevylaitteella.

4.1 Lämmönjohtavuus

Materiaalin lämmöneristävyys vaikuttaa nykytiedon mukaan partikkelitasolla huokosissa oleva ilman määrä sekä materiaalin kennorakenteen lämmönjohtavuus. Mittaustilanteessa suurimpina muuttujina lämmönjohtavuuteen vaikuttaa tiheys, mittauslämpötila sekä kosteus. Näiden tekijöiden hallinta on haasteellista.

Tutkittavien materiaalien lämmönjohtavuus mitattiin TTY:n rakennustekniikan laitoksen rakennusfysiikan ryhmän käytössä olevalla lämpövirtalevylaitteella. LaserComp FOX304 –lämpövirtalevylaitteella voidaan mitata 300 mm x 300 mm koekappaleita, joiden paksuus on korkeintaan 100 mm. Laite täyttää standardin ISO 8301 (1991) vaatimuksen. Laitteen mittaustarkkuus on ± 1 %. Kalibroinnin epävarmuus huomioiden riippumaton tarkkuus on ± 3 % (Vinha et al. 2005).



Kuva 4.1.1 Lämpövirtalevylaitteen rakenneperiaate.

Lämpövirtalevylaitteen mittaustulos kuvaa tutkittavan materiaalin lämmönjohtavuutta stationääritilassa. Lämpövirta on yksiulotteinen ja lämmönjohtavuus voidaan laskea yhtälöstä.

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{\Delta T} \quad (4.1.1)$$

missä

λ = lämmönjohtavuus [(m·K)/W]

q = lämpövirta tutkittavan materiaalin läpi [W]

d = koekappaleen paksuus [m]

ΔT = koekappaleen yli vaikuttava lämpötilaero [K]

Tutkittavista materiaaleista tehtiin kolme koekappaletta. Koekappaleiden koko oli 300 mm x 300 mm ja paksuus vaihteli vanerin 15 mm paksuudesta mineraalivillan 100 mm paksuuteen. Kappaleita säilytettiin huonelämpötilassa ja vastaavassa tasapainokosteudessa. Mittauksen keskilämpötiloina käytettiin +10 °C ja +2,5 °C. Lämpövirta koetilanteessa johdettiin ylälevystä alalevyyn päin. Irtoeristeet mitattiin konvektiokokeessa käytetyillä tiheyksillä polyuretaanilevystä tehdyssä koemuotissa, jonka pohjalla oli ohut muovikalvo. Lämpövirtalevyalaite mittaa lämmönjohtavuuden koekappaleen keskeltä noin 100 mm x 100 mm alalta. Koemuotin reunat eivät näin ollen vaikuttaneet koetulokseen.



Kuva 4.1.2 Lämmönjohtavuuden mittauslaitteisto.

Lämmönjohtavuuden mittauksesta kerrotaan perusteellisemmin TTY:n tutkimusraportissa 129, Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona (Vinha et al. 2005).

Taulukon 4.1.1 mittaustulokset ovat kolmen kokeen keskiarvoja. Näiden lisäksi mitattiin kalibroitieristeiden lämmönjohtavuus, jonka perusteella määritettiin

kalibrointieristeen läpäisemä lämpöteho. Mittausarvot poikkeavat toimittajien esittämistä arvoista. Näitä arvoja ei tule käyttää λ_{Design} -arvoina, koska ne eivät huomioi eristeen asennukseen tai valmistukseen liittyviä poikkeamia.

Taulukko 4.1.1 Koerakenteissa käytettyjen materiaalien keskimääräiset lämmönjohtavuudet ja tiheydet.

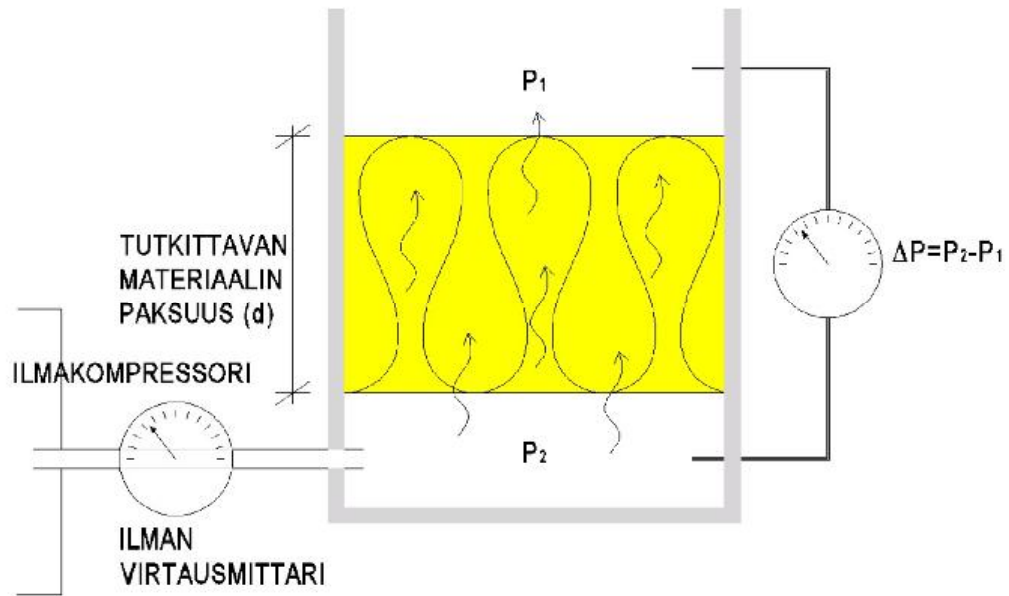
Materiaali	Koe	Tiheys ρ [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus λ_{10} [W/(m·K)]
Puhalluslasivilla, käsin levitetty	PUH	25,0	0,039
Puukuitueriste, käsin levitetty (300 mm paksut eristekerrokset)	PUU	34,5	0,044
Puukuitueriste, käsin levitetty (600 mm paksut eristekerrokset)	PUU	40,7	0,042
Lasivillalevy 100 mm	LEVY	23,6	0,034
Vaneri 15 mm, mittaussuunta poikittain levyä vasten	-	680	0,12

Puhallettavat eristeet levitettiin mittauskaukaloon käsin. Eristettä ei tiivistetty erityisemmin vaan sullottiin siten, että tiheysvaatimus täyttyi.

4.2 Ilmanläpäisevyys

Materiaalin ilmanläpäisevyys on rakennusfysikaalisesti merkitsevä suure. Jos materiaalin ilmanläpäisevyys on suuri, voi materiaalin sisällä tapahtua ilmavirtauksia. Rakenteen lämmönvastukseen rakennusosan huokoisuus vaikuttaa parantaen lämmönjohtumista kuvaavaa λ_{Design} -arvoa. Toisaalta huokoisuus lisää rakennusosassa tapahtuvaa sisäistä konvektiota.

Koemateriaalien ilmanläpäisevyydet mitattiin TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriossa. Mittaus suoritettiin ISO 9053:1991 standardin mukaisesti. Ilmanläpäisylaitteisto perustui standardin mukaiseen suoran ilmavirran menetelmään (menetelmä A).



Kuva 4.2.1 Ilmanläpäisevyyden mittauslaitteiston toimintaperiaate.

Ilmanläpäisylaitteistoon kuului teräksinen testikammio. Kammio voidaan irrottaa jalustastaan puhdistuksen ajaksi. Erillinen kompressori tuottaa tasaisen ilmavirtauksen ja synnyttää ulkoilmaa suuremman ilmanpaineen testikammion alaosaan. Ilmavirtauksen säätö tapahtuu erillisellä säätölaitteella. Paine-eroa mitataan kappaleen molemmiin puolin. Teräskammioon oli asennettu koekappaleen mittausta varten työntömitta, joka osoitti koekappaleen paksuutta.

Ilmanläpäisevyyden mittauslaitteisto mittasi paine-eroa eri ilmavirtauksen nopeuksilla. Materiaalin ilmanläpäisevyys laskettiin kaavalla:

$$\kappa_a = \frac{\left(\frac{R_a \cdot d}{A} \right)}{\Delta p} \quad (4.2.1)$$

missä

κ_a = ilmanläpäisevyys [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

R_a = ilman tilavuusvirta [m^3/s]

A = koekappaleen pinta-ala [m^2]

d = koekappaleen paksuus [m]

Δp = paine-ero koekappaleen ylä- ja alapuolella [Pa]

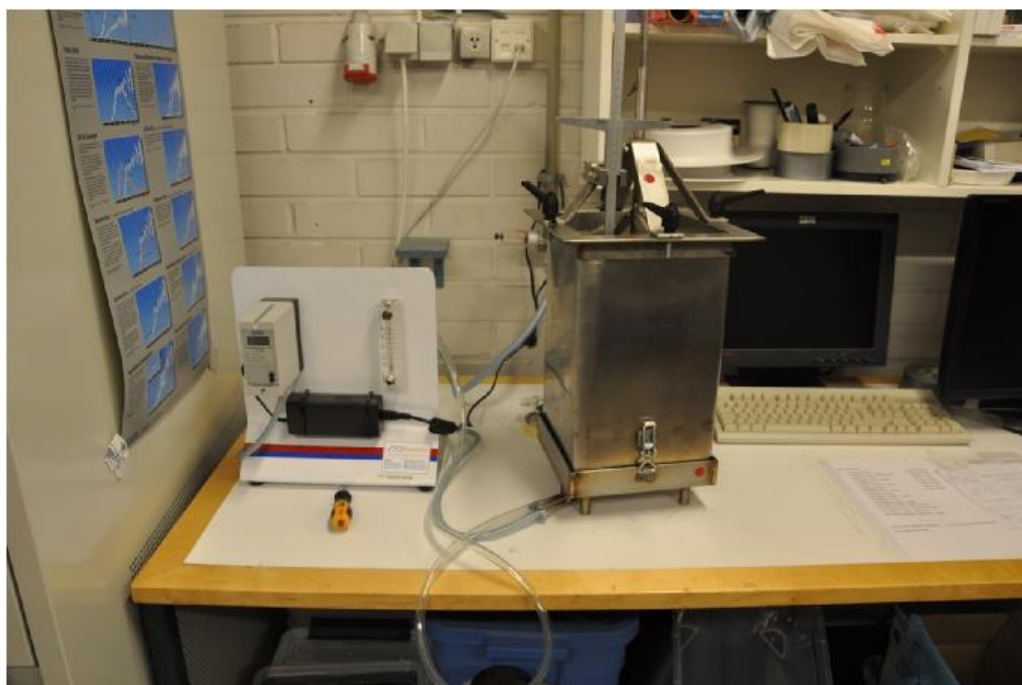
Koemenetelmän tarkkuus oli kappaleen paksuuden osalta $\pm 2,5$ %. Paineen mittaus tuli suorittaa 0,1 Pa tarkkuudella ja paineen mittaustarkkuus oli $\pm 5,0$ % (ISO 9053 1991).

Materiaalit asennettiin testikammioon samoin tavoin, tiheys huomioiden, kuin myöhemmin koerakenteeseen. Puukuitueristeen tilavuuspaino 300 mm paksussa lämmöneristekokeessa oli $34,5 \text{ kg/m}^3$ ja 600 mm paksussa lämmöneristekokeessa $40,7 \text{ kg/m}^3$.

Taulukko 4.2.1 Kokeellisesti tutkitut ilmanläpäisevyyden arvot.

Materiaali	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	Mitattu $\kappa_a \text{ [m}^3\text{/(m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa)]}$
Puhalluslasivilla	25,0	$3,504 \cdot 10^{-4}$
Puhalluspuukuitueriste	34,5	$4,179 \cdot 10^{-4}$
Puhalluspuukuitueriste	40,7	$2,361 \cdot 10^{-4}$
Lasivillalevy	23,6	$0,516 \cdot 10^{-4}$

Jokaisesta koekappaleesta tehtiin vähintään kolme rinnakkaiskoetta. Rinnakkaisten mittausten tuloksissa havaittiin yli 20 % eroja. Mittaus vaatii mittaustilalta äärimmäisen tasaisen ilmanpaineen, kun mittaustarkkuus tulee olla 0,1 Pa. Koetulokset osoittivat samansuuntaisia ilmanläpäisevyyden tuloksia kuin kirjallisuudessa on esitetty vastaaville tuotteille. Näitä ilmanläpäisevyyden tuloksia käytettiin myöhemmin tässä diplomityössä esitetyissä laskennallisissa tarkasteluissa.



Kuva 4.2.2 Ilmanläpäisevyyden mittauslaitteisto.

5. YLÄPOHJARAKENTEIDEN KOKEET

Kokeen valmistelu alkoi suunnittelulla ja kirjallisuustutkimuksella. Koejärjestelyn asennus, sijainti pakkahuoneessa sekä koejärjestelyyn vaikuttavien ulkoisten häiriötekijöiden eliminointi suunniteltiin huomioiden erillISRatkaisut. Tutkittavien materiaalien osalta materiaalivalmistajia pyydettiin toimittamaan kokeeseen tarvittava määrä lämmöneristeitä. Kokeen kulku alusta loppuun suunniteltiin ja laitteistoa testattiin ennen koesarjan aloittamista. Kokeen suoritus aikataulutettiin päivän tarkkuudella.

Standardi ISO/DIN 8990 (1994) käsittelee materiaalin lämmönläpäisykertoimen mittausta. Standardissa on annettu raja-arvot keskeisimpien muuttujien epätarkkuuksille. Lämmönläpäisylaitteiston vaatimuksia on käsitelty myös standardeissa DIN 52611 ja DIN 52619 (Vinha 1998).

5.1 Kokeiden aikataulu

Tutkimuksen valmistelu aloitettiin helmikuussa 2011. Alussa tehtiin suunnitelmia kokeen suorituksesta, koelaitteiston kokoonpanosta sekä oltiin yhteydessä koemateriaalien toimittajiin. Thermisol Oy:n Sastamalan tehdas toimitti lämpimän kammion kalibroimiseen tarvittavat EPS 80S –luokan eristeet. Saint Gobain-Isover Oy toimitti lasipuhallusvillaa sekä Fibratus Oy vastaavasti puukuitueristettä.

Koejärjestely tehtiin maaliskuuhuhtikuussa 2011. Polykarbonaattilevystä suunniteltiin ja rakennettiin suojakammio estämään pakkahuoneen lauhduttimien ilmavirtauksen vaikutusta tutkittavan eristekerroksen lämpötiloihin. Samalla rakennettiin tuulettimet polykarbonaattilevyistä kootun suojakammion sisään tuottamaan ilmavirtausta tutkittavan materiaalin pinnalle. Tuulettimia jouduttiin modifioimaan asennukseen liittyen, koska niiden moottorit sijoitettiin suojakammion ulkopuolelle. Tällöin moottorien tuottama lämpöteho ei vaikuttanut suojakammion sisälämpötilaan.

Huhtikuun lopulla 2011 suoritettiin koelaitteistossa käytettävien termolankojen kalibrointi. Tämä tapahtui Weussin lämpökaapissa. Kalibroinnin päätyttyä koottiin laitteisto lopulliselle paikalleen. Toukokuun 21. päivä aloitettiin tutkimuksen 1. osan lämpimän kammion kalibrointi EPS 80S-eristeellä. Ensimmäinen puukuitueristeen koe tehtiin 2.6.2011. Yhden yksittäisen kokeen vaatima ajanjakso oli 24 h – 59 h välillä.

Taulukko 5.1.1 Tutkimuksen 1. osan rakennekokeet ja niiden aikataulu.

Nro	Koerakenne	Alkoi	Päätyi	Kokonaisaika
01	PUU300	08.07.2011	09.07.2011	29h
02	PUU300T	12.07.2011	14.07.2011	38h
03	PUU600	07.06.2011	10.06.2011	59h
04	PUU600T	10.06.2011	11.06.2011	28h
05	PUH300	12.06.2011	13.06.2011	33h
06	PUH300T	13.06.2011	14.06.2011	25h
07	PUH600	18.06.2011	21.06.2011	48h
08	PUH600T	21.06.2011	22.06.2011	34h
09	LEVY300	26.06.2011	28.06.2011	34h
10	LEVY300T	23.06.2011	24.06.2011	29h
11	LEVY600	28.06.2011	30.06.2011	43h
12	LEVY600T	30.06.2011	01.07.2011	28h
13	LEVYPUH300	01.07.2011	03.07.2011	34h
14	LEVYPUH300T	03.07.2011	04.07.2011	24h
15	LEVYPUH600	04.07.2011	06.07.2011	52h
16	LEVYPUH600T	06.07.2011	08.07.2011	32h

Kokeiden päätyttyä tulokset analysoitiin. Koetulokset osoittivat, että koerakenteiden lämpötilojen mittaukset onnistuivat suunnitellulla tavalla. Lämmitystehon mittausta ja säätöä oli tarpeellista parantaa, jotta kokeista voitiin määrittää koerakenteiden läpi menevät lämpövirrat riittävän tarkasti. Tätä varten koerakenteita tutkittiin vielä tutkimuksen 2. osassa.

Tutkimuksen toisen osan valmistelu alkoi syyskuussa 2011. Tässä yhteydessä testattiin uutta säädettävää jännitelähdettä sekä siihen liittyvää mittausohjelmistoa. Mittausohjelmiston asennuksen yhteydessä sijoitettiin puolijohdeanturit mittaamaan lämmitystehon säädössä tarvittavia lämpötiloja. Puolijohdeantureilla mitattiin myös koerakenteiden sisä- ja ulkopinnan lämpötiloja. Testausvaiheessa tarkkailtiin tehon kulutusta ja tehtyjen havaintojen perusteella tiivistettiin sisäkammion epäjatkuvuuskohtia. Tutkimuksen 2. osan rakennekokeet alkoivat tammikuussa 2012 ja päättyivät toukokuussa.

Taulukko 5.1.2 Tutkimuksen 2. osan rakennekokeet ja niiden aikataulu.

Nro	Koerakenne	Alkoi	Päättyi	Kokonaisaika
01	PUU600	21.01.2012	06.02.2012	404h
02	PUU600T	07.02.2012	16.02.2012	209h
03	PUH600/ 1	16.02.2012	27.02.2012	265h
04	PUH600/ 2	13.04.2012	20.04.2012	166h
05	PUH600T	27.02.2012	05.03.2012	161h
06	LEVY600	05.03.2012	12.03.2012	164h
07	LEVY600T	12.03.2012	19.03.2012	167h
08	LEVYPUH600	26.03.2012	05.04.2012	234h
09	LEVYPUH600T	19.03.2012	26.03.2012	168h
10	PUU300	20.04.2012	24.04.2012	93h
11	PUH300	05.04.2012	13.04.2012	189h

PUH300 ja PUU300 rakennekokeissa tutkittiin vain tuulettamaton tilanne ja eristeen pinnan suuntainen ilmavirtaus ulkopinnalla eli koevaiheet 1 ja 2 (ks. luku 5.5). Näiden kokeiden lisäksi suoritettiin koejärjestelyn kalibrointi ennen ja jälkeen koesarjan. Kalibrointikerta kesti noin 2 viikkoa.

5.2 Koelaitteisto

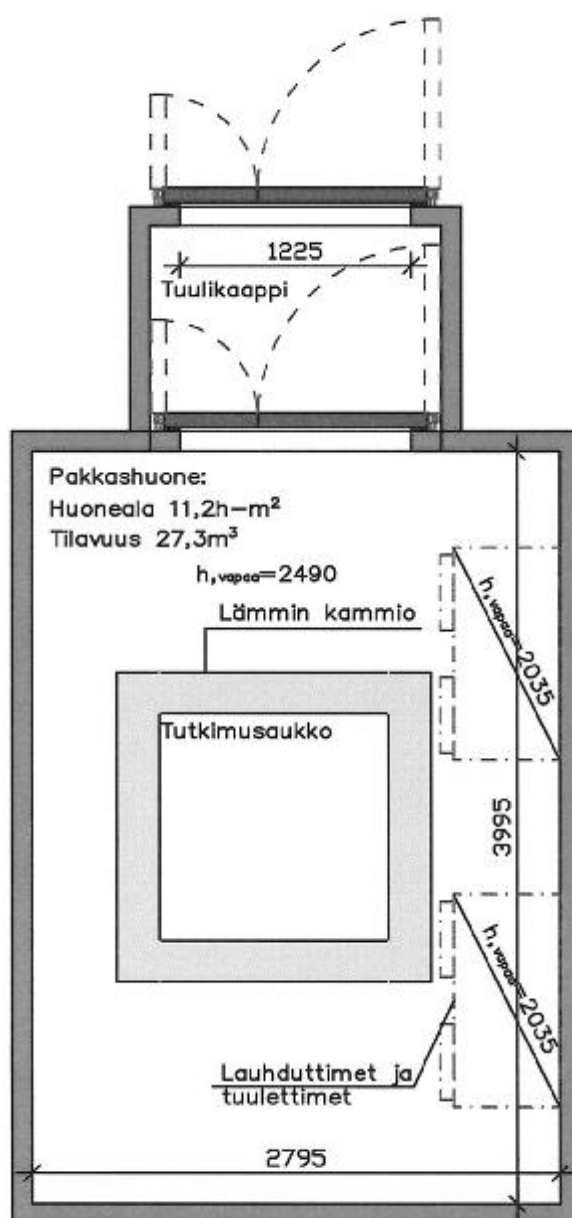
Koelaitteisto rakennettiin TTY:n rakennustekniikan laitoksen rakennushallissa olevaan v. 2005 rakennettuun pakkashuoneeseen. Pakkashuoneen huonepinta-ala on noin 11 h-m² ja tilavuus on noin 27,3 m³. Lämmin kammio sijoitettiin pakkashuoneen keskelle lauhduttimien puhaltimien väliin (ks. kuva 5.2.1).

Pakkashuoneen seinät ja katto oli rakennettu teräsohutlevysandwich-elementeistä. Pakkashuoneen lattia oli vuorattu kyynel-levyllä. Piirustusten mukaan lattian verhouksen alla oli ~100 mm lämmöneristekerros. Pakkashuoneeseen johti kaksilehtiset ovet. Sisään tultaessa oli ilmasulkuna toimiva eteistila. Pakkashuoneen seinässä eteisen molemmin puolin oli läpimenokohdat johdotuksille. Läpimenot tiivistettiin pehmeällä eristeriveellä.

Pakkashuoneen lauhduttimien puhaltimet kierrättivät ilmaa pakkashuoneessa. Nämä puhaltimet tuottivat pakotetun ilmavirtauksen pakkashuoneessa. Ilmavirtauksen hallitsemiseksi tutkittavan eristeen pinnalla rakennettiin lämpimän kammion päälle polykarbonaattilevystä suojakammio. Suojakammio oli alumiinirunkoinen. Koesarjaa edeltävissä koeajoissa havaittiin, että ulkolämpötila ei tasaantunut toivotulla tavalla eristeen ulkopuolella. Tämä johtui siitä, kun suojakammio oli kiinni lämpimän kammiossa ja muodosti tutkittavan eristemateriaalin päälle suljetun ilmatilan. Lämpötilan tasaantui erittäin hitaasti suojakammion sisällä ja jatkuvan vakio- lämpötilan ylläpito olisi vaatinut jatkuvaa pakkashuoneen lämpötilan säätöä. Kokeen nopeuttamiseksi ja ulkoilman hystereesin vähentämiseksi nostettiin lämpimän kammion päällä oleva suojakammio 9 mm irti lämpimän kammion ulkopinnan eristysten

pinnasta. Tämä ei vaikuttanut merkittävästi tuulettamattomassa tilanteessa eristeen pinnalla tapahtuvaan ilmavirtaukseen. Ilmavirtaus oli hyvin pientä ja tarkastusmittauksella saatiin sen arvoksi 0,06 m/s.

Suojakammiossa oli kaksi tuuletinta. Nämä tuottivat pinnan suuntaista ja pintaa vastaan kohtisuoraa ilmavirtausta lämmöneristeen ulkopinnalle. Ilmavirtausta mitattiin TSI-8388 monitoimimittarilla katteen ulkopuolelta mittausanturin (kuumalanka-anemometri) ulottuessa tutkittavan 600 mm paksuisen lämmöneristeen ulkopinnalle. Ilmavirtausta ei mitattu 300 mm paksun lämmöneristeen ulkopinnalta. Todennäköisesti laminaarinen ilmavirtaus (koevaihe 2) ei ollut yhtä voimakas 300 mm paksun kuin 600 mm paksun lämmöneristeen ulkopinnalla. Tuulettimien teho säädettiin virtalähteen jännitteellä ja jokaisessa kokeessa käytettiin samoja jännitteen ja virran arvoja.



Kuva 5.2.1 Pakkashuoneen pohjapiirros ja koelaitteiston sijoitus.

Lämpimän kammion ulkovaippa oli eristetty solupolystyreeni -elementeillä. Kammion pohjan ja pakkashuoneen lattian väliin asennettiin 50 mm solupolystyreenilevy tutkimuksen 1. osassa. Lämpimän kammion sisäpinnassa oli 12 mm vesivaneri lukuun ottamatta yläpohjaa, jossa oli 15 mm vesivaneri. Koelaitteistossa oli lämpimän kammion päällä tutkittavalle lämmöneristeelle aukko. Aukon pinta-ala oli 1,44 m² ja sivumitta oli 1200mm. Tutkittavan rakenteen enimmäispaksuus oli 600 mm.

Sisätilan lämmitys tapahtui tutkimuksen 1. osassa 19 m pitkällä DeviKit lämmityskaapelilla, joka oli kiinnitetty havuvanerilevyyn. Lämmityskaapelin ominaisteho oli noin 190 W. Lämpötilaa säädettiin jaksottaisella ns. ON/OFF -

termostaatilla. Kokeen aikana termostaatti oli päällä 6 min – 11 min jaksoissa. Lämmitysjakson pituus riippui koerakenteesta ja rakennepaksuudesta. Menetelmä aiheutti sisälämpötilaan hystereesiä, jonka vaihteluväli oli noin 0,5 °C. Tutkimuksen 2. osassa sisätilan lämmitystä säädettiin lämmitysvastuksilla, joiden jännitettä muutettiin 0,01 V tarkkuudella säädettävän Agilent E364xA -jännitelähteen avulla. Tällöin lämpimän kammion sisäilman lämpötila oli kaikissa kokeissa 20,0 °C (ks. taulukko 5.5.2)

Tutkimuksen 1. osassa lämpötilat taltioitiin LogiTec in dataloggerilla ja mittaustieto konvertoitiin excel -muotoon BenchLink Data Logger 3.0 ohjelmalla. Lämpötila mitattiin K-tyypin termolangoilla. Standardin DIN EN 60584-2 (1994) mukaan lankojen mittaustoleranssi on $\pm 1,5$ °C tai $\pm 0,004 \cdot T$. Lankojen mitta-alueet olivat -40 ... +1000 °C.

Lämpimän kammion häviötehon kalibrointi suoritettiin tutkimuksen 2. osassa ennen ja jälkeen koesarjan. Kalibroinnissa tutkimusaukkoon asennettiin 600 mm tai 300 mm paksuinen EPS-eriste, jonka lämmönjohtavuus määritettiin kolmen eri koekappaleen mittaustuloksen keskiarvona. Kalibroitieristeet valmistettiin Thermisol in Sastamalan tehtaalla. Häviöteho määritettiin lämpimään kammioon syötetystä kokonaistehosta kaavalla:

$$\Phi_h = \Phi_{\text{kok}} - \Phi_{\text{kal}} = \Phi_{\text{kok}} - \frac{T_{\text{si}} - T_{\text{se}}}{\frac{d_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + \frac{d_{\text{vaneri}}}{\lambda_{\text{vaneri}}}} \cdot A \quad (5.2.1)$$

missä

Φ_h = lämpimän kammion häviöteho [W]

Φ_{kok} = lämpimään kammioon syötetty kokonaisteho [W]

Φ_{kal} = kalibroinnissa käytetyn rakenteen läpäisemä lämpövirta [W]

λ_{EPS} = EPS-eristeen lämmönjohtavuus [W/(m·K)]

d_{EPS} = EPS-eristeen paksuus [m]

λ_{vaneri} = pohjavanerin lämmönjohtavuus [W/(m·K)]

d_{vaneri} = pohjavanerin paksuus [m]

A = tutkimusaukon pinta-ala [m²]

$T_{\text{si}}, T_{\text{se}}$ = rakenteen sisä- ja ulkopinnan lämpötila [°C]

Häviötehonkulutuksen ero kalibroinnissa oli suurimmillaan 3,3 %, kuitenkin tuulettamattomassa tilanteessa 0,7 %. Koerakenteen kalibroinnin epävarmuus tutkimustuloksiin on esitetty liitteessä 3.

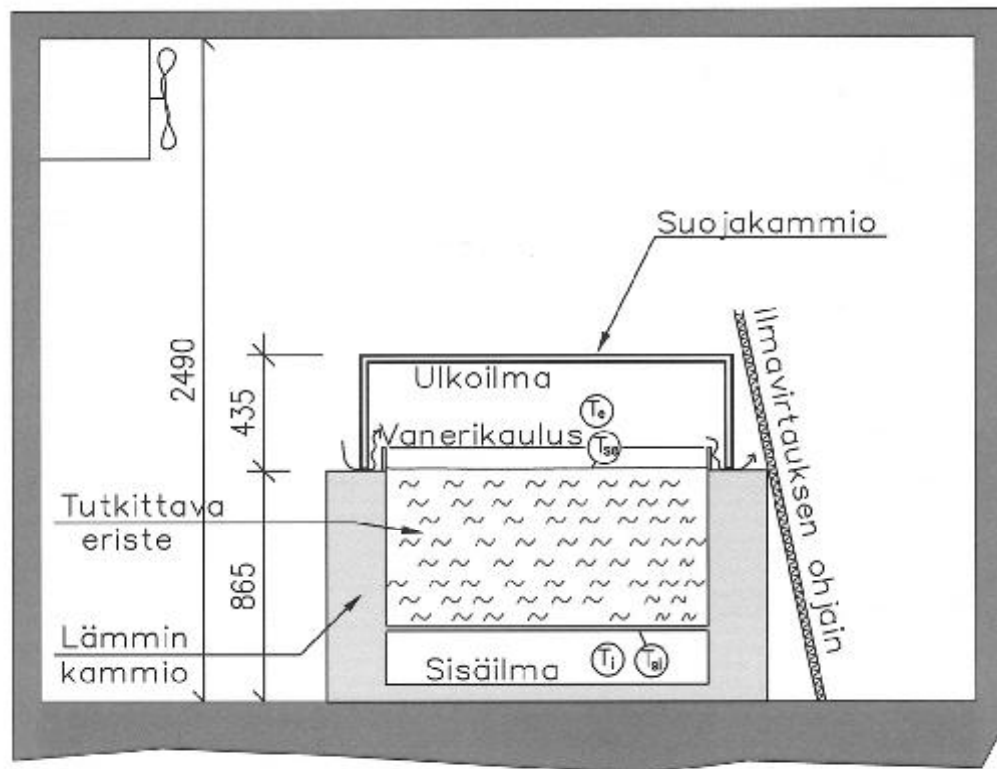
Kokeen mittausepävarmuuden maksimiarvoina voidaan pitää

- | | |
|--|--------------|
| - Lämpötila K-luokan thermolangoilla
(lämpötilakentät eristeessä) | $\pm 5,3 \%$ |
| - Lämpötila TTY:n puolijohdeantureilla | $\pm 3,8 \%$ |
| - Lämpövirran tiheys | $\pm 8,0 \%$ |
| - Eristeen paksuus | $\pm 2,5 \%$ |

Koerakenteesta PUH600 tehtiin vertailukoe ensimmäisen koetuloksen varmistamiseksi. Vertailukokeessa U-arvon muutos oli toisen koetuloksen PUH600/ 2 perusteella tuulettamattomassa tilanteessa 13%, pinnan suuntaisen ilmavirtauksen vaikuttaessa 7% ja pintaa vastaan kohtisuoran ilmavirtauksen vaikuttaessa 13% pienempi kuin PUH600/ 1 -kokeessa. Näiden kahden kokeen tulokset ovat esitetty liitteessä 2 s. 31-48.

5.2.1 Tutkimuksen 1. osa

Ensimmäisessä osassa tutkittiin eristekerroksissa esiintyviä lämpötilaeroja. Referenssitietona olivat aiemmin TTY:llä tehtyjen alustavien kokeiden tulokset ja havainnot kokeiden suorittamisesta. Koelaitteisto esivalmisteltiin sekä lämpötilojen mittausjärjestelmä koottiin ja kalibroitiin. Kokeen aikana mitattiin lämpötiloja sisäilmasta, lämmöneristeestä sekä ulkoilmasta. Lämmöneristeen sisällä mittauksia tehtiin eristeen ulkopinta mukaan lukien enimmillään 35 termolangalla viidestä vertikaalista mittauslinjasta. Yhdessä mittauslinjassa oli 5 termolankaa. Ulkolämpötilaa mitattiin vastaavilta kohdilta kuin koerakenteiden sisältäkin.



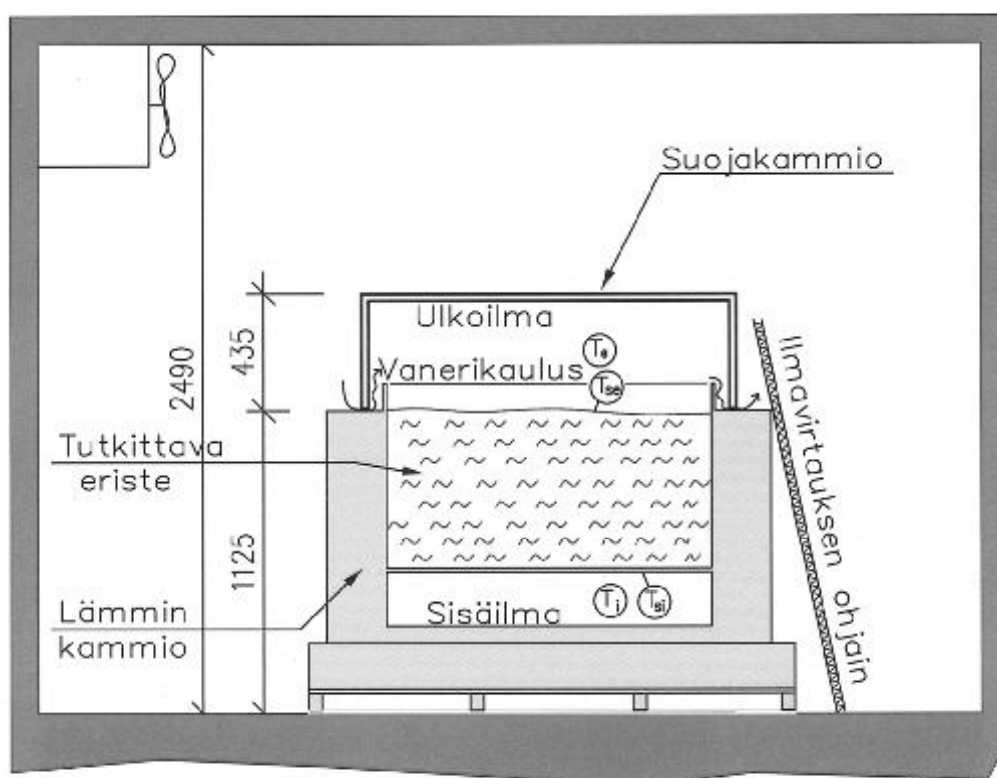
Kuva 5.2.2 Periaatekuva tutkimuksen 1. osassa käytetystä koejärjestelystä.



Kuva 5.2.3 Lämpimän kammion sisätila tutkimuksen 1. osassa. DewiKit lämmityskaapeli oli asennettu välilevyn alapintaan.

5.2.2 Tutkimuksen 2. osa

Tutkimuksen toisessa osassa muutettiin koejärjestelyä siten, että lämpimän kammion alapohjan eristettiin 170 mm PU-eristeellä 50 mm EPS-eristeen lisäksi. Lämmin kammio koolattiin 50 x 50 mm soiroilla irti pakkashuoneen lattiasta, jolloin koelaitteiston alle muodostui tuulettuva ilmarako. Toimenpiteellä estettiin pakkashuoneen lattian vaikutus lämpimän kammion häviötehoon. Lämpimän kammion pohjan sisäpinnan lämpötilaa tarkkailtiin samoin kuin tuuletusraon lämpötilaa. Näissä ei esiintynyt poikkeavia mittausrvoja, joten rakennekokeissa lämpimän kammion pohjan kautta tapahtunut lämpöhäviö oli samanlainen. Lisäksi lämpimän kammion epäjatkuvuuskohdat tiivistettiin polyuretaanipohjaisella elastisella liimamassalla sekä saumateipillä ilmavuotojen estämiseksi. Näillä toimenpiteillä lämmitystehon kulutus laski noin 20 %.



Kuva 5.2.4 Periaatekuva tutkimuksen 2. osassa käytetystä koejärjestelystä.

Kaikissa kokeissa käytettiin samoja asetuksia sisä- ja ulkoilman olosuhteina. Suhteellista kosteutta kokeessa ei tarkkailtu. Mittaustuloksissa oli havaittavissa hystereesiä sekä sisä- että ulkoilman lämpötilassa. Liitteessä 2 esitetään puolijohdeantureilla mitatut lämpötilatulokset kokeen eri vaiheissa. Sisäilman ja sisäpinnan lämpötila oli lähes vakio yhtä koetta lukuun ottamatta. Ulkopinnan lämpötila vaihteli ilmavirtauksesta ja lämmöneristeestä sekä sen pinnan struktuurista riippuen. Ilmavirtaus eristeen pinnalla vaikutti pintavastuksen suuruuteen.

5.3 Koerakenteet

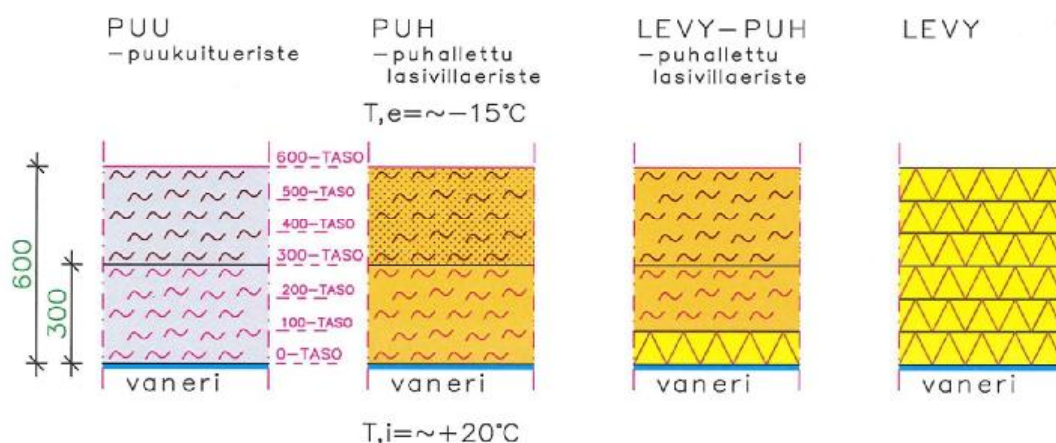
Tutkitut lämmöneristemateriaalit edustavat rakentamisessa yleisesti käytettyjä eristemateriaaleja. Näitä materiaaleja käytetään kattavasti pientalorakenteista teollisuusrakenteisiin. Tämän tyyppisistä eristemateriaaleista löytyi myös laskennallista sisäisen konvektion tutkimustietoa.

Tutkittavat koerakenteet valittiin Frame -projektin johtoryhmän kanssa. Tutkimuksen aikataulutuksen vuoksi rakenteiden määrä oli rajattu. Kokeen valmisteluun kului aikaa noin 30 h / koerakenne. Yhden rakenteen tutkimiseen kului aikaa noin 180 h sekä raportointia ja tulosten käsittelyä noin 30 h.

5.3.1 Tutkimuksen 1. osassa tutkitut koerakenteet

Tutkimuksen ensimmäisessä osassa tutkittiin laajemmin 300 mm ja 600 mm paksuilla eristekerroksilla toteutettuja rakenteita. Tutkimuksessa oli mukana puhalluseristeitä, joiden materiaalitoimittajina olivat Fibratus Oy ja Saint Gobain-Isover Oy. Levyvillan toimittaja oli Saint Gobain-Isover Oy. Lämmöneristeet asetettiin lämpimän kammion tutkimusaukkoon mahdollisimman homogeenisesti. Puhalluseristeiden tiheyttä mitattiin asennuksen aikana. Lähtökohtana oli valmistajan antama asennustiheys eristeelle.

Lämpimän kammion kalibroinnissa käytettiin konvektiovapaata eristeettä, (solupolystyreeni-eriste EPS 80S.) Tämän eristeen toimitti Thermisol Oy Sastamalan tehdas. EPS-eristeen lämmönjohtavuus oli samaa luokkaa kuin tutkittavien eristeiden lämmönjohtavuus huomioonottamatta sisäisen konvektion vaikutusta.



Kuva 5.3.1 Koerakenteet, materiaalikerrokset, koeolosuhteet sekä mittaustasot tutkimuksen 1 osassa (Pakkanen 2011).

Tutkimuksessa käytetyt materiaalit oli pakattu tehtaan pakkauksiin. Ennen lämpimän kammion tutkimusaukkoon asennusta materiaalipartikkelit eroteltiin porakonevispilällä sekoittaen. Tämän jälkeen mitattiin materiaalin tilavuuspaino. Huokoisen eristeen

kohdalla asennus tapahtui kuvan 5.3.2 mukaisesti. Eriste ripoteltiin kauhalla tasalaatuisesti tutkimusaukkoon. Eristeen purkamisen yhteydessä tarkastettiin, ettei eristemateriaaliin ollut jäänyt onkaloita.



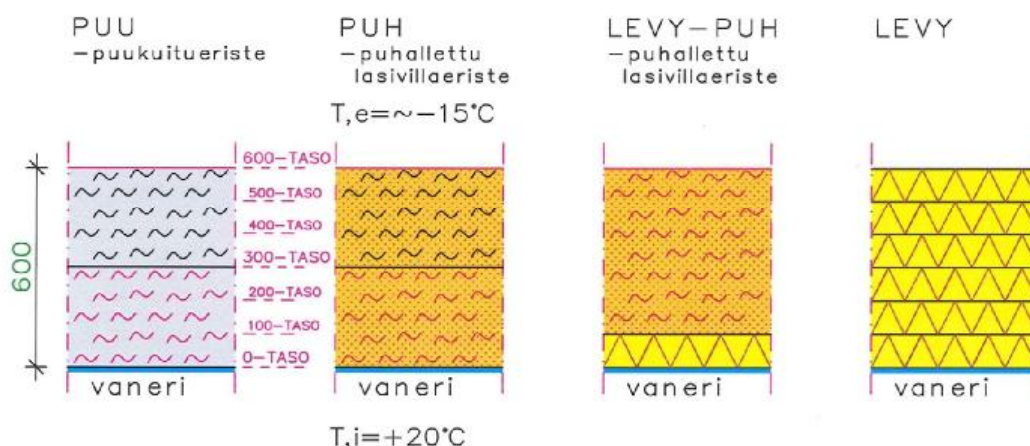
Kuva 5.3.2 Eristemateriaalin asennus tutkimusaukkoon (Pakkanen 2011).

5.3.2 Tutkimuksen 2. osassa tutkitut koerakenteet

Tutkimuksen toisessa osassa tutkittiin lähinnä paksumpia eristekerroksia. Laskennallisten tarkasteluiden perusteella oletetaan huokoisessa mineraalivillassa tapahtuvan sisäistä konvektiota yli 370 mm kerrospaksuudella 35 °C lämpötilaeron vaikuttaessa (Shankar & Hagentoft 2008).

Yksi koe kesti noin 8-10 päivää. Koerakenteiden määrää jouduttiin karsimaan aikataulusyystä 8 koerakenteeseen, joissa eristepaksuus oli 600 mm. Lopuksi tutkittiin kaksi koerakennetta 300 mm eristepaksuudella ja PUH600/ 2 koerakenne. Lisäksi lämmin kammio kalibroitiin ennen koesarjaa sekä koesarjan jälkeen. Kalibroinnissa määritettiin lämpimän kammion häviöteho.

Tutkimuksen toisessa osassa tehtiin yhdestä koerakenteesta rinnakaiskoe. Kokeen PUH600/ 1 lämmitystehon kulutuksen varmistamiseksi tehtiin toinen PUH600/ 2 -koe. Toisen kokeen perusteella saatiin lisävarmuutta kokeen mittausrvirheestä ja käsin tehtyyn asennukseen liittyvästä virheestä. Rinnakkaisten koetulosten välistä epätarkkuutta on käsitelty tarkemmin kohdassa 5.2 sekä kokeen mittaus tulokset ovat esitetty liitteessä 2.

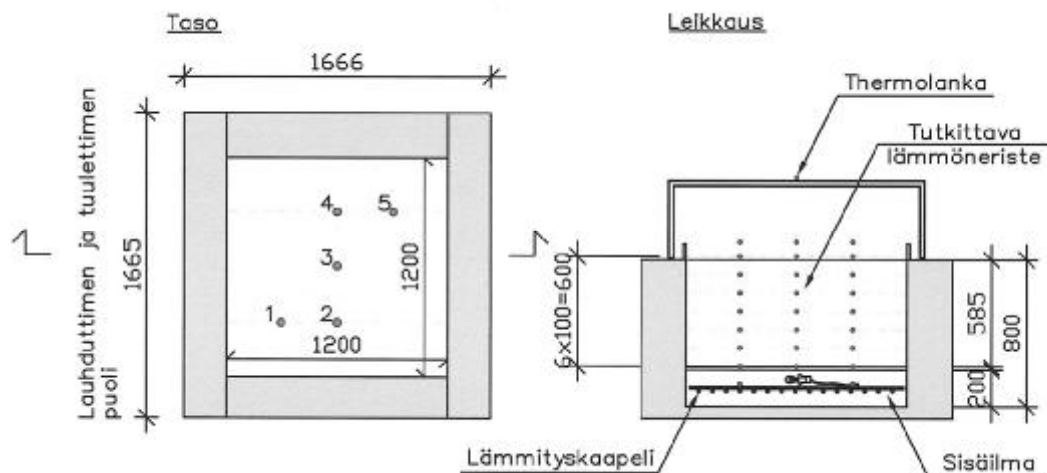


Kuva 5.3.3 Koerakenteet, materiaalikerrokset, koeolosuhteet sekä mittauspaikat tutkimuksen 2. osassa.

5.4 Mitatut suureet ja mittauspaikat

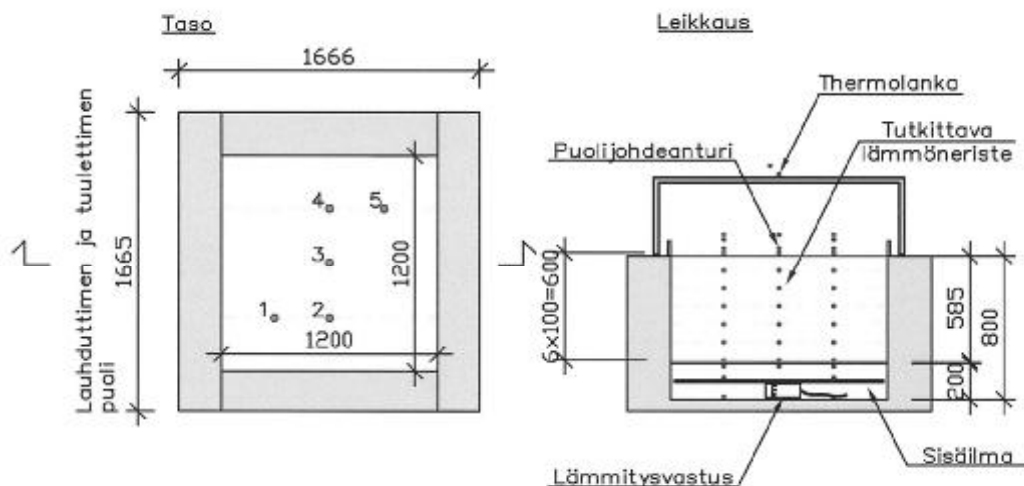
Tutkimuksen 1. osan lämpötilakenttien mittausaineisto perustui termolangoilla mitattuihin lämpötila-arvoihin. Liitteessä 1 on esitelty mittautulokset kuvaajien muodossa. Ulko- ja sisälämpötilaa mitattiin useilla antureilla. Eristeessä vaikuttavia lämpötiloja seurattiin viidessä pisteessä horisontaalisuunnassa. Mittauspisteitä oli 100 mm välein. Ulkolämpötila mitattiin 50 mm etäisyydeltä 600 mm paksun lämmöneristeen ulkopinnasta ja 100 mm etäisyydellä 300 mm paksun lämmöneristeen ulkopinnasta. Lisäksi mitattiin pakkahuoneen lämpötilaa suojakammion ulkopuolelta ja lämpimän kammion alta sekä sivulta.

Eristeen paksuutta mitattiin pistokoemaisesti. Lämpötilan mittauslinjoille vertikaalisuunnassa oli 100 mm välein asennettu linjalangat, joiden perusteella eristeet asennettiin paikoilleen. Tutkimusaukkoon asennetun lämmöneristeen vahvuus vaihteli 585 mm ja 610 mm välillä 600 mm paksuissa rakennekokeissa. Ohuemman 300 mm paksuisen lämmöneristeen paksuutta ei tarkastettu, vaan eriste asennettiin linjalankojen mukaisesti. Asennustarkkuus vastasi hyvin käytäntöä työmailla. Paksuuden vaihtelut vaikuttivat koetuloksiin ja laskennalliseen lämmönläpäisykertoimen arvoon hyvin vähän.



Kuva 5.4.1 Lämpötilojen mittauslinjat ja -pisteet tutkimuksen 1. osassa.

Tutkimuksen toisessa osassa mitattiin lämpimän kammion sisätilaan johdetun lämmitystehon suuruutta. Koejärjestelyä muutettiin lämmitystehoa tuottavan laitteen osalta. Lisäksi kokeen tulokset tallennettiin TTY:llä kehitetyllä CLIMATE -ohjelmalla. Tutkittavien rakenteiden määrää rajattiin tutkimuksen 1. osaan verrattuna. Yhden rakennekokeen tekeminen kesti noin 1,5 viikkoa.



Kuva 5.4.2 Lämpötilojen mittauslinjat ja -pisteet tutkimuksen 2. osassa.

Tutkimuksen 2. osassa mitattiin tarkemmilla puolijohdeantureilla lämpimän kammion sisätilan lämpötilaa. Liitteessä 2 esitetyistä kuvista voidaan havaita 10 h mittausjakson aikana tapahtuneen sisälämpötilan muutoksen pysyneen $\pm 0,1$ °C välillä kaikissa kokeissa.

Ulkolämpötila vaihteli suuremmalla vaihteluvälillä. Eristeen ulkopuolelta mitattu ulkolämpötila oli 600 mm paksuilla rakenteilla $-0,3/ +0,4$ °C välillä kaikissa kokeissa. Ulkolämpötilan säätö oli epätarkempi johtuen pakkahuoneen ilmatilavuudesta ja

jäähdytyksen jaksottaisesta säädöstä. Koejärjestelyn tiiveyden parantamisen aikana tarkasteltiin mahdollisuutta sijoittaa pakkashuoneen termostaatti suojakammion sisään, jolloin ulkolämpötilan säätö olisi mahdollisesti tarkemmin vastannut standardin SFS-EN ISO 8990 ohjearvoja. Toimenpide ei ollut kuitenkaan teknisesti toteutettavissa vaaditussa aikataulussa.

Standardin SFS-EN ISO 8990 (1994) ohjearvojen mukaisesti ulko- ja sisätilan lämpötilojen vaihtelu stationääritilassa saa olla ± 1 % mitattavasta lämpötilaerosta. Lämpötilat saavat näin ollen vaihdella $\pm 0,35$ °C välillä. Kokeissa ulkolämpötilan toleranssi oli lähes standardin vaatimuksen mukainen ja sisälämpötilan vaihtelu täytti standardin vaatimuksen.

5.5 Koeolosuhteet

Tutkimuksen 1. ja 2. osa suoritettiin ennalta asetetuissa lämpötiloissa. Tutkimuksen 1. osassa ulkolämpötilaksi pakkashuoneeseen oli säädetty -16,5 °C ja vastaavasti sisälämpötilaksi 20,4 °C. Sekä lämmitys- että jäähdytysjärjestelmät toimivat jaksottaisen termostaatin ohjauksessa. Lämpötiloissa esiintyi hystereesiä. Tutkimuksen 1. osan sisä- ja ulkolämpötilat sekä lämpötilaero ovat esitetty taulukossa 5.5.1.

Kokeen 1. vaihe kuvasi tuulettamatonta tilannetta lämmöneristeen ulkopinnalla. Kokeen toisessa vaiheessa lämmöneristeen ulkopintaan puhallettiin tuulettimella pinnan suuntainen ilmavirtaus. Kokeen kolmannessa vaiheessa kuvattiin myrskytuulta eristeen pintaa vastaan kohtisuoralla puhaltavalla ilmavirtauksella. Tutkimuksen 1. osassa kokeeseen kuului neljäs vaihe, jossa sisäkammiossa paloi lamppu aiheuttaen pistemäisen lämpötehon koerakenteeseen. Tällöin eristeen ulkopinta oli tuulettamaton kuten kokeen 1. vaiheessa..

Taulukko 5.5.1 Tutkimuksen 1. osan sisä- ja ulkolämpötilat sekä lämpötilaero koevaiheessa 1 (tuulettamaton tilanne).

Nro	Koerakenne	T_i [°C]	T_e [°C]	ΔT [°C]
01	PUU300	19,60°C	-15,38°C	34,98°C
02	PUU300T	20,05°C	-15,55°C	35,60°C
03	PUU600	20,08°C	-15,77°C	35,85°C
04	PUU600T	20,22°C	-15,87°C	36,10°C
05	PUH300	19,64°C	-15,47°C	35,11°C
06	PUH300T	19,71°C	-15,57°C	35,28°C
07	PUH600	19,81°C	-16,04°C	35,85°C
08	PUH600T	19,32°C	-16,04°C	35,37°C
09	LEVY300	19,99°C	-15,69°C	35,68°C
10	LEVY300T	20,20°C	-15,47°C	35,89°C
11	LEVY600	19,61°C	-16,21°C	35,81°C
12	LEVY600T	19,97°C	-15,92°C	35,88°C
13	LEVYPUH300	20,14°C	-15,60°C	35,74°C
14	LEVYPUH300T	19,76°C	-15,42°C	35,18°C
15	LEVYPUH600	19,95°C	-15,76°C	35,71°C
16	LEVYPUH600T	19,50°C	-15,63°C	35,13°C

Taulukon 5.5.1 lämpötila-arvot ovat mittaustuloksista otettuja 6 h keskiarvoja. Mittaus on suoritettu k-tyypin termolangoilla.

Tutkimuksen toisessa osassa lämmitysjärjestelmä muutettiin. Tästä johtuen sisälämpötiloissa esiintynyt hystereesi väheni oleellisesti. Tutkimuksen 2. osassa pakkahuoneen lämpötilaksi oli säädetty -15,5 °C ja sisälämpötilaksi 20,0 °C.

Seuraavassa taulukossa on esitetty tutkimuksen 2. osan sisä- ja ulkolämpötilat sekä sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötilat. Taulukossa tuulettamaton tarkoittaa kokeen 1. vaihetta. Laminaarinen tarkoittaa kokeen 2. vaihetta, jolloin tuulettimella puhallettiin koerakenteen ulkopinnalle pinnan suuntaista ilmavirtausta. Turbulenttinen tarkoittaa taulukoissa 5.5.2 ja 5.5.3 kokeen 3. vaiheessa koerakenteen pintaa vasten kohtisuoraan puhaltavan ilmavirtauksen vaikutusta.

Taulukko 5.5.2 Tutkimuksen 2. osan sisä- ja ulkolämpötilat sekä pintalämpötilat kaikissa koevaiheissa.

Koerakenne	Koevaihe	T_i [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_e [°C]	ΔT [°C]
PUU300	- 1. vaihe	20,00	19,47	-12,61	-13,85	33,85
	- 2. vaihe	20,00	19,49	-12,86	-14,40	34,40
PUU600	- 1. vaihe	20,00	19,62	-15,14	-15,37	35,37
	- 2. vaihe	20,00	19,60	-14,81	-15,21	35,21
	- 3. vaihe	20,00	19,53	-15,09	-15,30	35,30
PUU600T	- 1. vaihe	20,00	19,64	-14,29	-15,17	35,17
	- 2. vaihe	20,00	19,63	-14,45	-15,28	35,28
	- 3. vaihe	20,00	19,63	-14,49	-15,31	35,31
PUH300	- 1. vaihe	20,00	19,43	-12,99	-14,05	34,05
	- 2. vaihe	20,00	19,47	-13,12	-14,22	34,22
PUH600/ 1	- 1. vaihe	20,00	19,58	-14,20	-14,69	34,69
	- 2. vaihe	20,00	19,57	-14,13	-14,69	34,69
	- 3. vaihe	20,00	18,86	-14,67	-14,84	34,84
PUH600/ 2	- 1. vaihe	20,00	19,62	-14,22	-14,67	34,67
	- 2. vaihe	19,99	19,60	-14,34	-14,77	34,76
	- 3. vaihe	20,00	18,90	-14,63	-14,81	34,81
PUH600T	- 1. vaihe	20,00	19,62	-13,95	-14,91	34,91
	- 2. vaihe	20,00	19,60	-13,83	-15,03	35,03
	- 3. vaihe	20,00	19,60	-13,86	-15,09	35,09
LEVY600	- 1. vaihe	20,00	19,70	-14,51	-14,75	34,75
	- 2. vaihe	20,00	19,70	-14,69	-14,94	34,94
	- 3. vaihe	20,00	19,68	-14,85	-15,01	35,01
LEVY600T	- 1. vaihe	20,00	19,70	-14,29	-14,73	34,73
	- 2. vaihe	20,00	19,70	-14,42	-14,94	34,94
	- 3. vaihe	20,00	19,69	-14,50	-15,05	35,05
LEVYPUH600	- 1. vaihe	20,00	19,63	-14,15	-14,81	34,81
	- 2. vaihe	20,00	19,65	-13,98	-14,84	34,84
	- 3. vaihe	20,00	19,50	-14,71	-14,95	34,95
LEVYPUH600T	- 1. vaihe	20,00	19,66	-13,81	-14,90	34,90
	- 2. vaihe	20,01	19,67	-13,83	-14,92	34,92
	- 3. vaihe	20,00	19,61	-13,95	-15,00	35,00

Taulukon 5.5.2 lämpötilamittaukset suoritettiin puolijohdeantureilla. Lämpötilat määritettiin 10 h keskiarvona eli 5 h mittausjakson molemmin puolin. Lämpötilaero vaikuttaa rakenteen yli eli sisäilmasta ulkoilmaan.

Laminaarinen eli koerakenteen pinnan suuntainen ilmavirtaus toteutettiin suojakammioon asennetun vaakatasossa toimivan tuulettimen toimesta. Ilmavirtausta seurattiin pistokokeena ja sen voimakkuus oli $< 1,0$ m/s. Eristeen pintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttava ilmavirtaus toteutettiin suojakammion keskelle kiinnitetyllä tuulettimella. Tämä aiheutti eristeen pinnalle $< 2,0$ m/s ilmavirtauksen. Ilmavirtaukset mitattiin 600 mm koerakenteen pinnalta seitsemästä kohtaa seitsemän mittaustuloksen keskiarvona. Näistä 49 mittaustuloksesta muodostui yksi mittauskerta.

Taulukko 5.5.3 Keskimääräiset ilmavirtauksen arvot 600 mm paksujen koemateriaalien ulkopinnalla tutkimuksen 1. osassa.

Koerakenne	1.vaihe	2.vaihe	3.vaihe
PUU600	-m/s	0,47 m/s	1,54 m/s
PUU600T	-m/s	0,70 m/s	1,88 m/s
PUH600	0,07 m/s	0,47 m/s	1,48 m/s
PUH600T	0,07 m/s	0,54 m/s	1,93 m/s
LEVY600	0,02 m/s	0,49 m/s	1,83 m/s
LEVY600T	0,05 m/s	0,62 m/s	1,85 m/s

Kaikkien 21 mittauskerran perusteella ilmavirtauksen nopeus eristeen ulkopinnalla oli tuulettamattomassa vaiheessa (1. vaihe) 0,06 m/s, laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa (2. vaihe) 0,59 m/s ja turbulenttisen ilmavirtauksen aikana (3. vaihe) 1,76 m/s. Tuulensuojakankaan ollessa eristeen ulkopinnalla ilmavirtauksen nopeus kasvoi noin 9 % turbulenttisen ilmavirtauksen vaiheessa. Tuulettamattomassa vaiheessa ja laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa ilmavirtauksen nopeus ei poikennut lämmöneristeen vapaasta pinnasta mitatuista ilman virtausnopeuksista. Ilmavirtauksen suuntaa lämmöneristeen ulkopinnalla ei pystytty arvioimaan merkkisavun avulla tarkasti kokeen 2. tai 3. vaiheessa. Kohtisuoraan lämmöneristeen ulkopintaa vasten vaikuttavan ilmavirtauksen virtausnopeus mitattiin eristeen pinnan suuntaisesti.

Oluemmilla 300 mm paksuisilla lämmöneristeillä tehdyissä kokeissa laminaarinen ilmavirtaus ei ollut yhtä tehokas kuin 600 mm lämmöneristeillä tehdyissä kokeissa. Koejärjestelyssä tuuletin oli asennettu kiinteästi suojakammion sivulle vertikaalietäisyyden ollessa noin 200 mm paksumman eristeen pinnasta ja 500 mm ohuemman koe-eristeen pinnasta. Ilmavirtausta ei mitattu 300 mm paksujen lämmöneristeiden ulkopinnan tasosta.

6. KOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU

Kokeen tulokset perustuvat lämpötilatietojen ja lämmitystehon mittaustietojen käsittelyyn. Mittaustiedot konvertoitiin Excel-ohjelmaan .xls -tiedostoiksi. Tuloksia tarkasteltiin järjestelmällisesti samoilla sovellutuksilla. Mittausdatasta määritettiin jakson kohta, jonka molemmiin puolin yksittäiset mittausravot olivat jatkuvuustilassa usean tunnin ajalta. Lopulliset mittausravot ovat useamman mittausarvon keskiarvoja. Mittausarvoja taltioitiin 1 min välein kaikissa kokeissa.

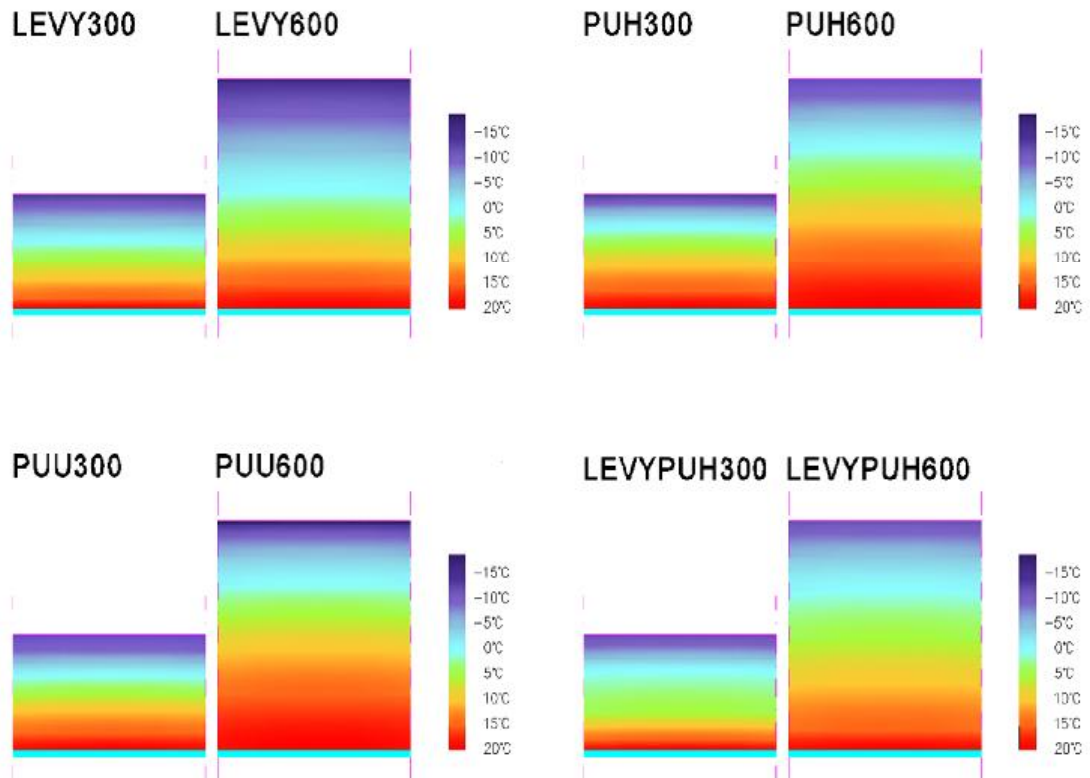
6.1 Lämpötilakentät koerakenteissa

Tutkimuksen 1. osa käsitti kuusitoista eri koetta. Jokaisessa kokeessa oli neljä vaihetta; tuulettamaton tilanne, laminaarinen ilmarvirtaus tutkittavan lämmöneristeen ulkopinnalla, turbulenttinen ilmarvirtaus tutkittavan eristeen ulkopinnalla ja pistemäinen lämmönlähde sisätilassa. Laminaarinen ilmarvirtaus tuotettiin puhaltimella eristeen ulkopinnan suuntaisesti noin 0-1 m/s nopeudella. Turbulenttinen ilmarvirtaus puhalsi kohtisuoraan eristeen ulkopintaa vasten noin 1-3 m/s nopeudella. Ilmarvirtauksen nopeus tarkastettiin pistekoeluentoisesti 600 mm rakennekokeiden ulkopinnalla. Ilmarvirtauksen mittaustulosten keskiarvot ovat esitetty taulukossa 5.5.3.

Pistemäisenä lämmönlähteenä sisäkammiossa oli uunilamppu, ominaisteholtaan 15 W. Lamppu tuotti sisätilaan lähes +40 °C:een lämpötilan. Suurin lämpötilaero esiintyi poikkeuksesta tutkittavan materiaalin sisäpinnassa 0-tasolla.

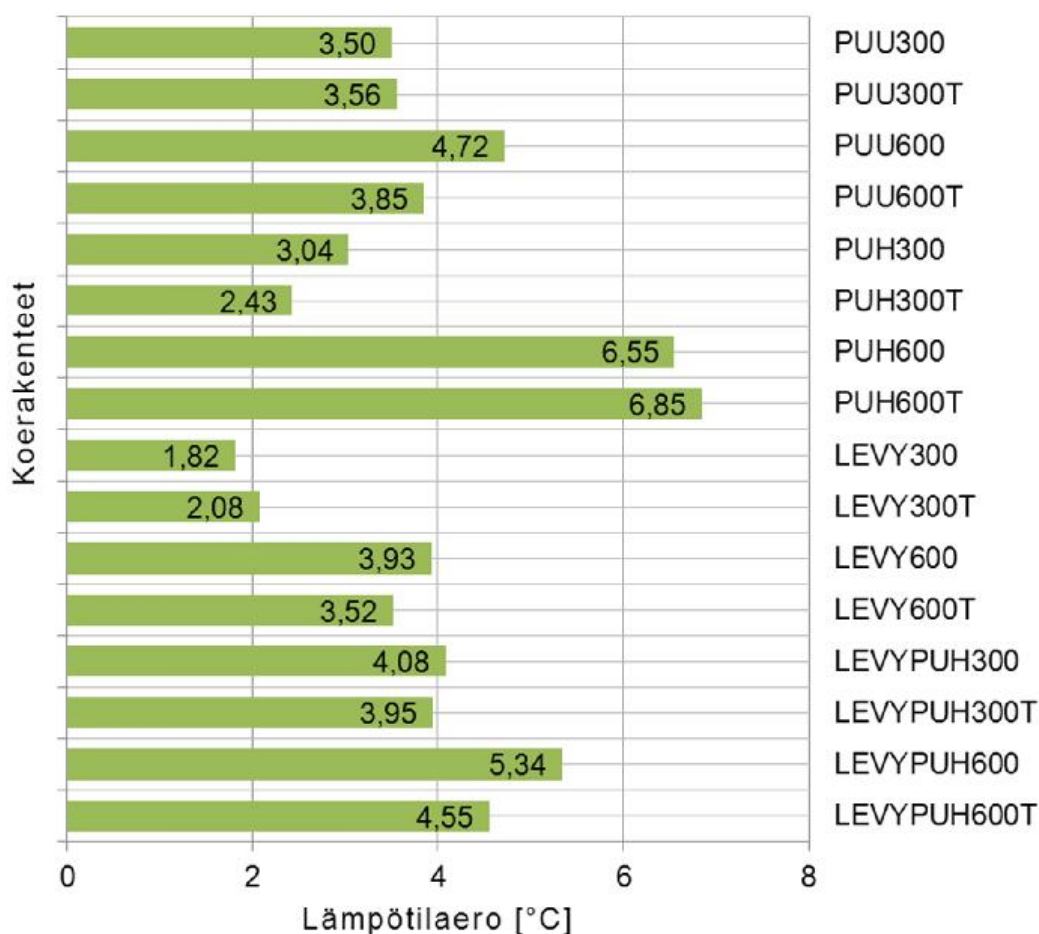
Tuulettamattomassa tilanteessa lämpötilaeroa syntyi selvästi avohuokoisilla eristeillä ja eron suuruus lisääntyi, kun tutkittavan lämmöneristeen pinnalla lisättiin ilman virtausta. Liitteessä 1 on esitelty koetulokset suhteellisten lämpötilakenttien muodossa. Lämpötilakentät on määritetty mittaustuloksista, jotka oli taltioitu eristeen paksuussuunnassa 100 mm välein. Kuvien esittämät tarkat tulospisteiden sijainnit ovat suhteellisia ja lineaarisesti mittaustuloksesta 100 mm välein kuvattuja.

Tuulettamattomassa tilanteessa liitteen 1 mukaan voidaan havaita suhteellisten lämpötilakenttien olevan tasaisia. LEVYPUH koerakenteessa lämpötilakenttien muutokset tuulettamattomassa tilanteessa olivat suurimmat (Liite 1 s. 29 ja 31.) Eristepaksuudella 300 mm sijaitseva 0 °C lämpötila aika tarkasti 2/3 -osan kohdassa eristepaksuudesta sisäpinnasta laskien. Vastaavasti 600 mm eristyspaksuudella 0 °C lämpötila oli noin 2/3 eristepaksuudella sisäpinnasta poislukien LEVY koerakenne, jossa 0 °C raja oli 300 mm korkeudella sisäpinnasta. Kokeessa 300 mm eristekerroksen pintalämpötilojen ero ulko- sekä sisälämpötiloihin oli huomattavasti suurempi kuin 600 mm eristekerroksessa. Ohuemmassa 300 mm eristekerroksessa lämpötila vaihtui 100 mm paksuudella 0 °C ... -12 °C, kun taas 600 mm eristekerroksessa 0 °C ... -14 °C lämpötilamuutos tapahtui 300 mm matkalla.



Kuva 6.1.1 Tuulettamattomassa tilanteessa 300 mm ja 600 mm eristekerroksessa vaikuttaneet lämpötilakentät. Lämpötilakentät on kuvattu mittauspisteiden 2 ja 3 keskiarvoina.

Kuvassa 6.1.2 on esitetty tuulettamattomassa tilanteessa mitatut yksittäisen mittaustason suurimmat lämpötilaerot tutkimuksen 1. osassa. Suurimmat lämpötilaerot esiintyivät PUH600 koerakenteessa ja pienimmät LEVY300 koerakenteessa. Koetulokset korreloivat hyvin mitattuihin ilmanläpäisevyyksiin. Tutkimuksen 2. osan perusteella voitiin todeta, ettei lämpötilaeroista voitu päätellä sisäisen konvektion määrää huokoisessa eristekerroksessa.



Kuva 6.1.2 Tuulettamattomassa tilanteessa (1. vaihe) mitatut yksittäisen mittaustason suurin lämpötilaero.

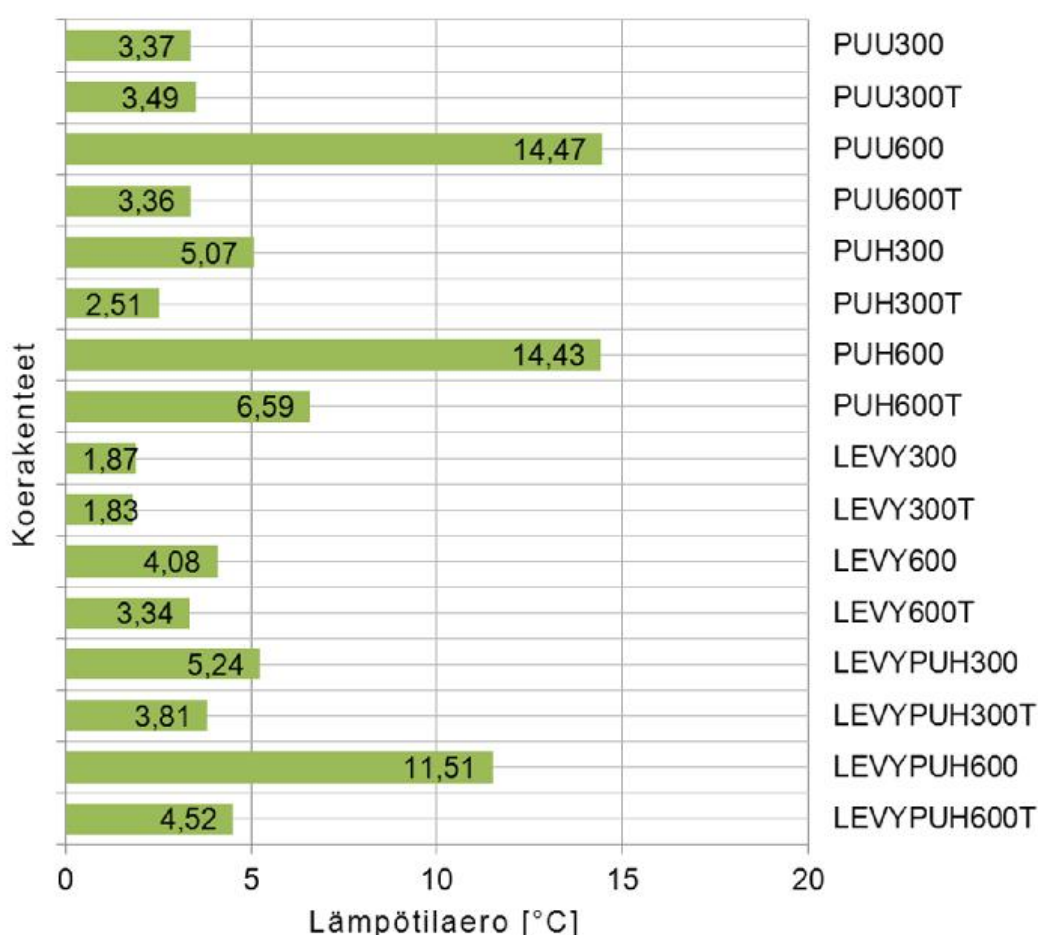
Liitteessä 1 esitettyjen suhteellisten lämpötilakenttien kuvista voitiin havaita laminaarisen ilmavirtauksen (ks. s. ix) vaikuttaessa muutoksia ulkopinnastaan avoimilla eristeillä. Tuulensuojakalvo suojasi eristettä kylmän ilman sekoittumiselta eristeen huokosissa olevaan lämpimään ilmaan. Tämä oli havaittavissa etenkin laminaarisen sekä turbulenttisen ilmavirtauksen (ks. s. x) vaikuttaessa. Yläpohjan ulkoseinälinjoilla tuulenohjainten käyttö estäisi edellä mainittujen ilmavirtausten vaikutuksen yläpohjan eristeen reuna-alueella. Yläpohjan ollessa altis ulkopuoliselle ilmavirtaukselle olisi tuulensuojaeristeen käyttö perusteltua kokeen tulosten perusteella. Laminaarisen ja turbulenttisen ilmavirtauksen vaikuttaessa ulkopinnassa 300 mm kerrospaksuudella eristeen sisäpinnan ja sisäilman lämpötilaero kasvoi seuraavasti.

Taulukko 6.1.1 Tutkimuksen 1. osan eristeen sisäpinnan ja sisäilman lämpötilaero.

Koerakenne	Lamiaarinen tila, ΔT	Turbulenttinen tila, ΔT
LEVY300	0,3°C	0,7°C
PUH300	0,6°C	10,3°C
PUU300	1,6°C	5,8°C
LEVYPUH300	1,0°C	2,7°C

Edellä olevista pintojen lämpötilaeroista voitiin päätellä tavanomaisten RakMK C4 (2003):ssa esitettyjen pintavastusten käytön aiheuttavan epätarkkuutta lämmönläpäisykertoimen laskentaan. Tätä epätarkkuutta ei ole otettu huomioon liitteen 2 kokeellisen ja teoreettisen lämmönläpäisykertoimen vertailukuvissa.

Tutkimuksen perusteella levylasivillan käyttö puhalletun lasivillan kanssa ohuella 300 mm kerrospaksuudella olisi parempi ratkaisu kuin pelkästään lasipuhallusvillan käyttö, kuten lämpötilan jakaumasta liitteen 1 tuloksista voidaan havaita. Eristeyhdistelmän suunnittelupaksuus on pienempi kuin pelkällä puhallusvillalla toteutetun eristyksen vastaava paksuus.

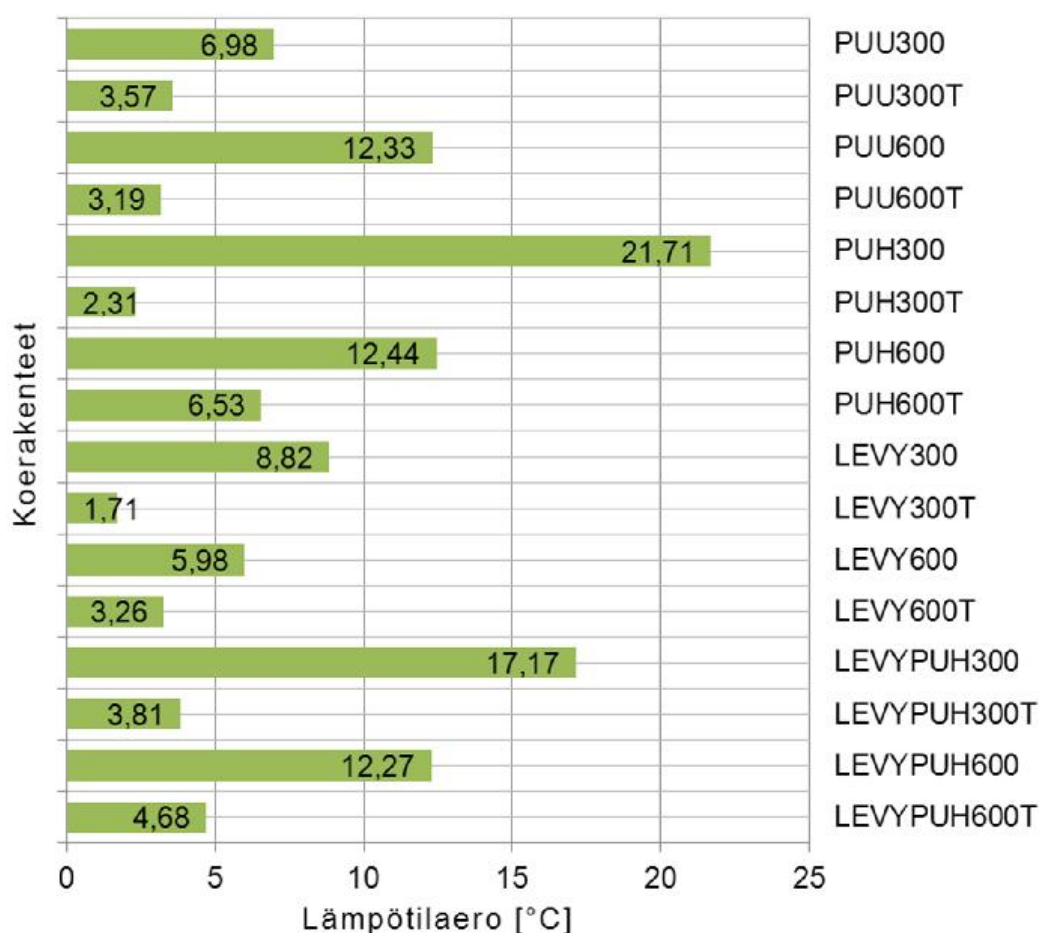


Kuva 6.1.3 Yksittäisen mittaustason suurin lämpötilaero laminaarisen ilmavirtauksen (2. vaihe) vaikuttaessa eristemateriaalin ulkopinnalla.

Kuten kuvasta 6.1.3 voidaan havaita, huokoisten pinnaltaan suojaamattomien eristeiden lämpötilaero eristeiden sisällä kasvaa laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa eristeiden ulkopinnalla. PUU600 koerakenteen suurin lämpötilaero esiintyi mittauspisteessä 2 ja eristeiden tasoilla 300 ... 600 (liite 1, sivu 21). Koerakenteessa PUH600 suurin lämpötilaero kuvan 6.1.3 mukaisesti oli mittauspisteessä 3 ja tasoilla 200 ... 400. (liite 1, sivu 13). Lämmöneristeessä esiintyvän lämpötilaeron sijainti ja syvyys johtuvat

ilmanläpäisevyyden lisäksi eristeiden erilaisista partikkelirakenteista sekä mahdollisesti asennuksesta. PUU600 koerakenteessa suurin lämpötilaero esiintyi puhaltimen edessä rakenteen yläpinnalla, kun taas PUH600 koerakenteessa suurin ero oli keskellä lämmöneristettä.

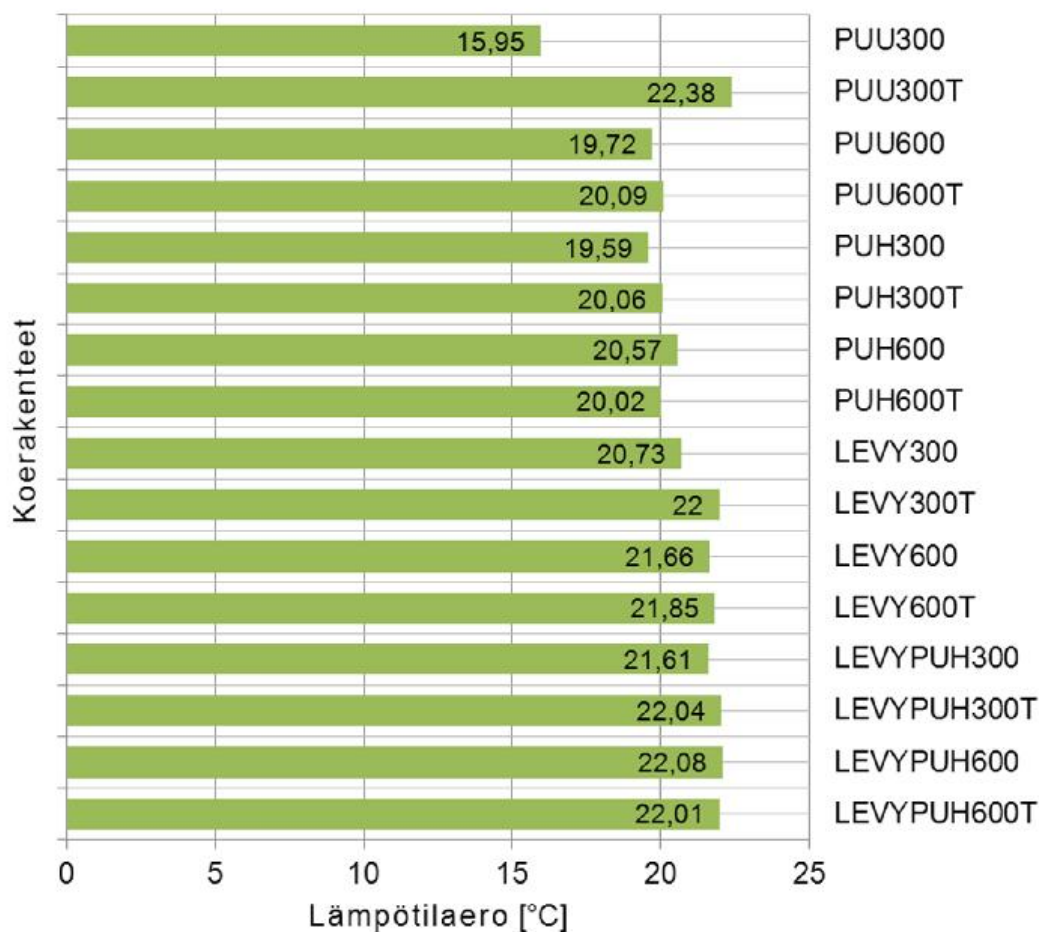
Kuvassa 6.1.4 on esitetty turbulenttisen ilmavirtauksen aiheuttama suurin lämpötilaero yksittäisessä mittauskentässä.



Kuva 6.1.4 Yksittäisen mittaustason suurin lämpötilaero turbulenttisen ilman virtauksen vaikuttaessa (3. vaihe) eristemateriaalin ulkopinnalla.

Turbulenttinen ilmavirtaus eli lämmöneristeen ulkopintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttava ilmavirtaus kuvasi myrskytuulen synnyttämiä ilmavirtauksia lämmöneristeen pinnalla ja se on siten harvoin tapahtuva ilmiö. Monimuotoisissa ja avoimilla räystäsrakenteilla varustetuissa yläpohjissa tämän tyyppistä ilmavirtausta saattaa tapahtua.

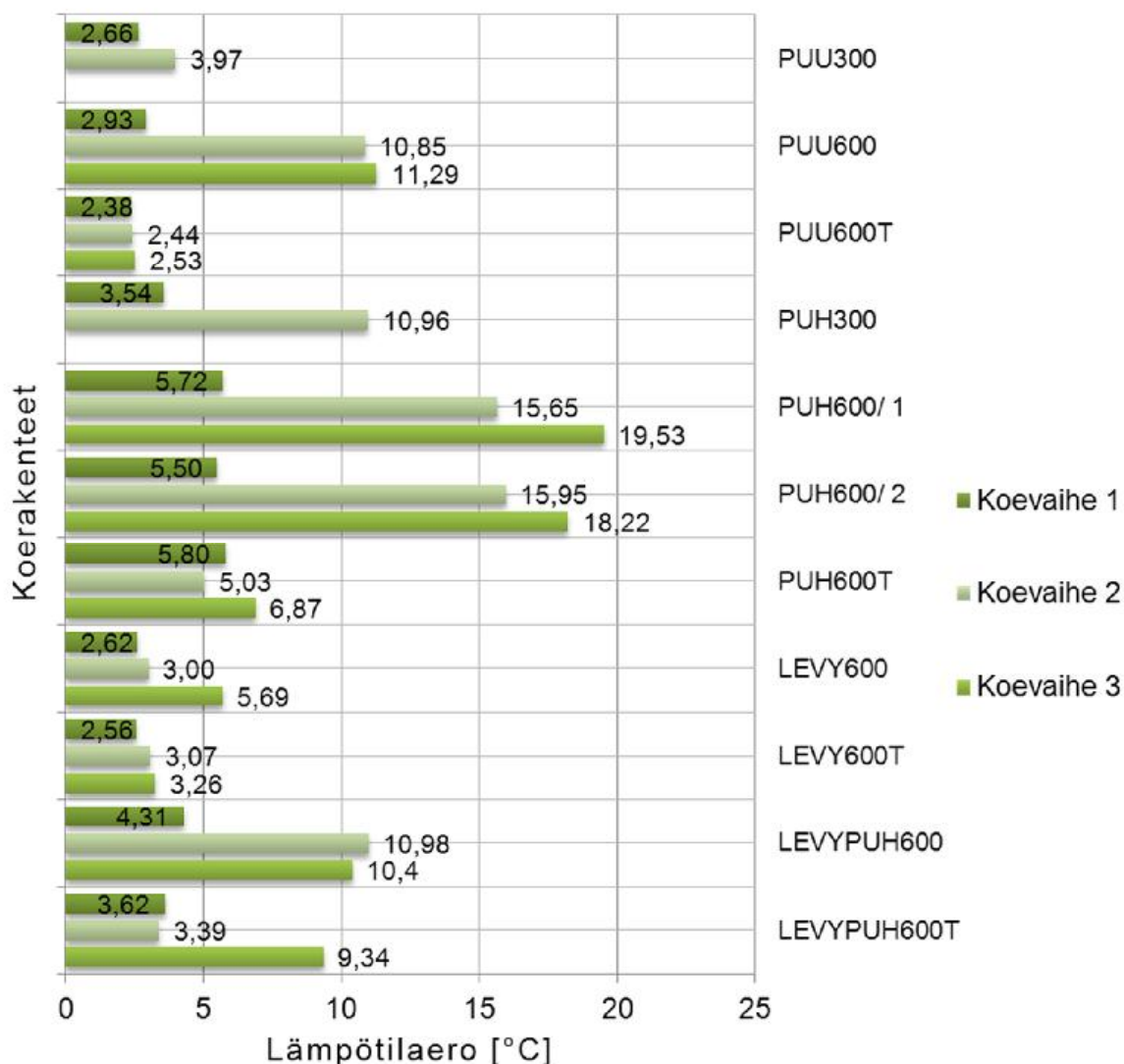
Kuvassa 6.1.5 on esitetty pistemäisen lämmönlähteen aiheuttama yksittäisen lämpötilan mittaustason suurin lämpötilaero. Lämmönlähde sijaitsi sisäkammiossa.



Kuva 6.1.5 Yksittäisen mittaustason suurin lämpötilaero pistemäisen lämpötehon (4. vaihe) vaikuttaessa sisätilassa.

Kuvan 6.1.5 tuloksien mukainen pistemäinen lämmönlähde saattaa syntyä yläpohjan sisäverhoukseen upotettavista valaisimista tai yläpohjan eristeessä kulkevasta sähköputkesta tai IV-kanavasta. Levyvilla tasaa parhaiten sisäpinnan lisälämmönlähteen aiheuttaman lämpötilan muutoksen (Liite 1 s. 2 ja 4).

Myös tutkimuksen toisessa osassa seurattiin lämpötilaeroja (ks. kuva 6.1.6). Lämpötilaerot olivat tutkittujen eristeiden osalta lähes samalla tasolla. Tutkimuksen 2. osassa PUU300 ja PUH300 koerakenteille tehtiin vain koevaiheet 1 ja 2 eli tuulettamaton tilanne sekä laminaarinen ilmavirtaus eristeen ulkopinnalla.



Kuva 6.1.6 Tutkimuksen 2. osan yksittäisen mittaustason suurimmat lämpötilaerot koevaiheissa 1-3.

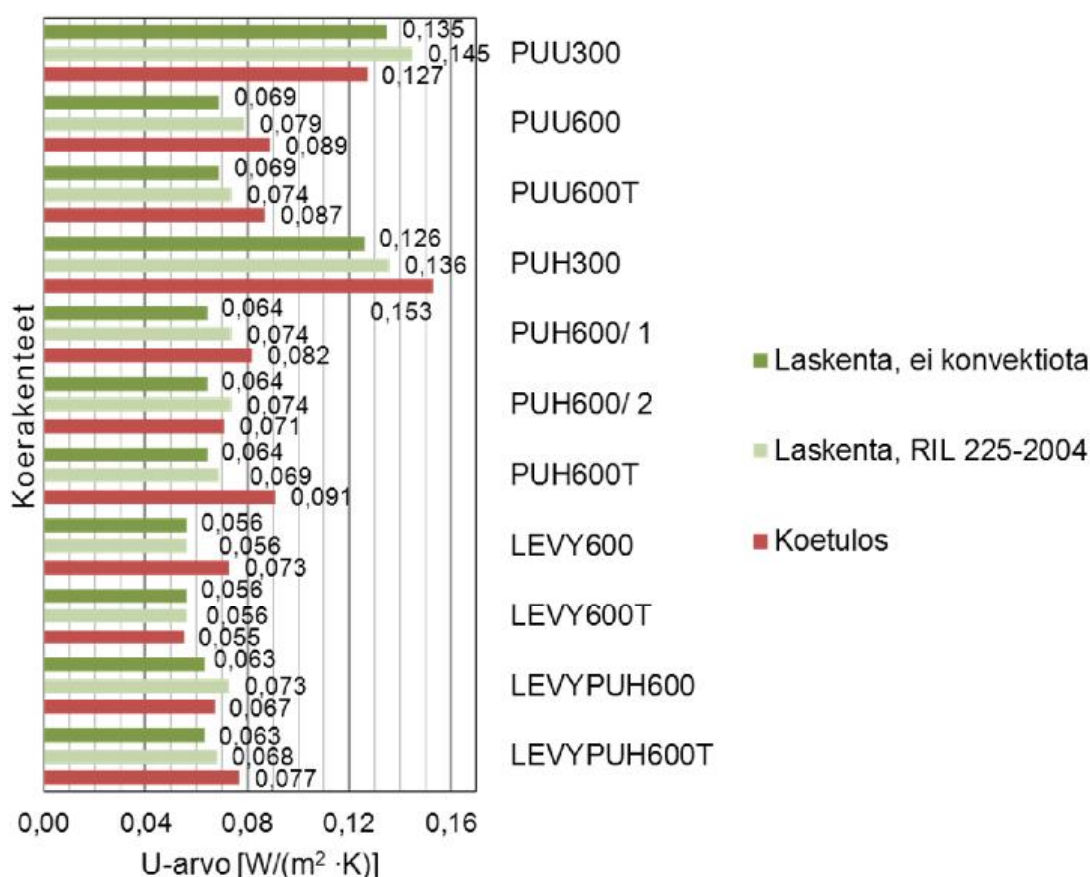
Tutkimuksen 1. ja 2. osan lämpötilaerojen vertailussa on havaittavissa PUU300 ja PUH300 osalta suuri ero kolmen koevaiheen kesken. Tuulettamattomassa tilanteessa lämpötilaero on lasivillalevyeristeen tasolla. Ulkopuolisen ilmavirtauksen vaikuttaessa lämpötilaero kasvaa voimakkaasti. Keskimääräinen eroavuus lämmöneriteiden lämpötilakentissä 1. ja 2. osan välillä oli ensimmäisessä koevaiheessa +/- 21 %, toisessa koevaiheessa 0 % ja kolmannessa koevaiheessa +/- 9 %.

Laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa eristeen ulkopinnan suuntaisesti (2. koevaihe) konvektion määrä näytti kasvavan erityisesti paksuilla puhalluseristeillä, joiden yläpinnassa ei ollut tuulensuojakalvoa. Tuulensuojakalvo suojasi ulkopinnassa erityisesti 300 mm paksuisia eristeitä ulkopuolisen ilmavirtauksen vaikutuksilta huokosissa olevaan ilmaan. Tutkimuksen 1. ja 2. osan välillä tulokset olivat lämpötilakenttien osalta pääpiirteittäin yhteneväiset, mutta puhalluseristeiden osalta

samassa koerakenteessa esiintyi eri tutkimusosien kokeiden välillä jonkin verran vaihtelua. Tämän perusteella voidaan todeta, että puhalluseristeillä eristetyissä yläpohjissa esiintyy myös lämmöneristyksen tehokkuudessa enemmän vaihtelua.

6.2 Lämmönläpäisykertoimet koerakenteissa

Lämmönläpäisykerroin (U_c) kuvaa rakenteen lämmöneristyskykyä. Tutkimuksen toisen osan tuloksien perusteella koerakenteille määritettiin tutkimusaukon läpi johtuneen lämpövirran (W) ja kokonaislämpötilaeron (K) perusteella U -arvo. Koerakenteille laskettiin teoreettinen U_c -arvo pelkään johtumiseen perustuen eli ilman sisäisen konvektion vaikutusta (Laskenta, ei konvektiota) sekä RIL 225-2004 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta (2005) -ohjeen mukaan eristeen ilmanläpäisevyyden huomioiva U_c -arvo (Laskenta, RIL 225-2004). Kuvassa 6.2.1 on esitetty kaikki kolme lämmönläpäisykerrointa kuvaavaa arvoa samalle eristeelle. U -arvot on määritelty sisä- ja ulkopinnan pintavastuksen kertoimet huomioiden. Laskennassa on käytetty sisäpinnan pintavastuksen arvona $R_{si} = 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ja ulkopinnan pintavastuksena $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Vanerin lämmönvastuksen arvona käytettiin $R_{vaneri} = 0,125 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.



Kuva 6.2.1 Tuulettamatomassa tilanteessa (vaihe 1) teoreettisen ja kokeellisen lämpövirran perusteella määritelty lämmönläpäisykertoimen arvo koerakenteille.

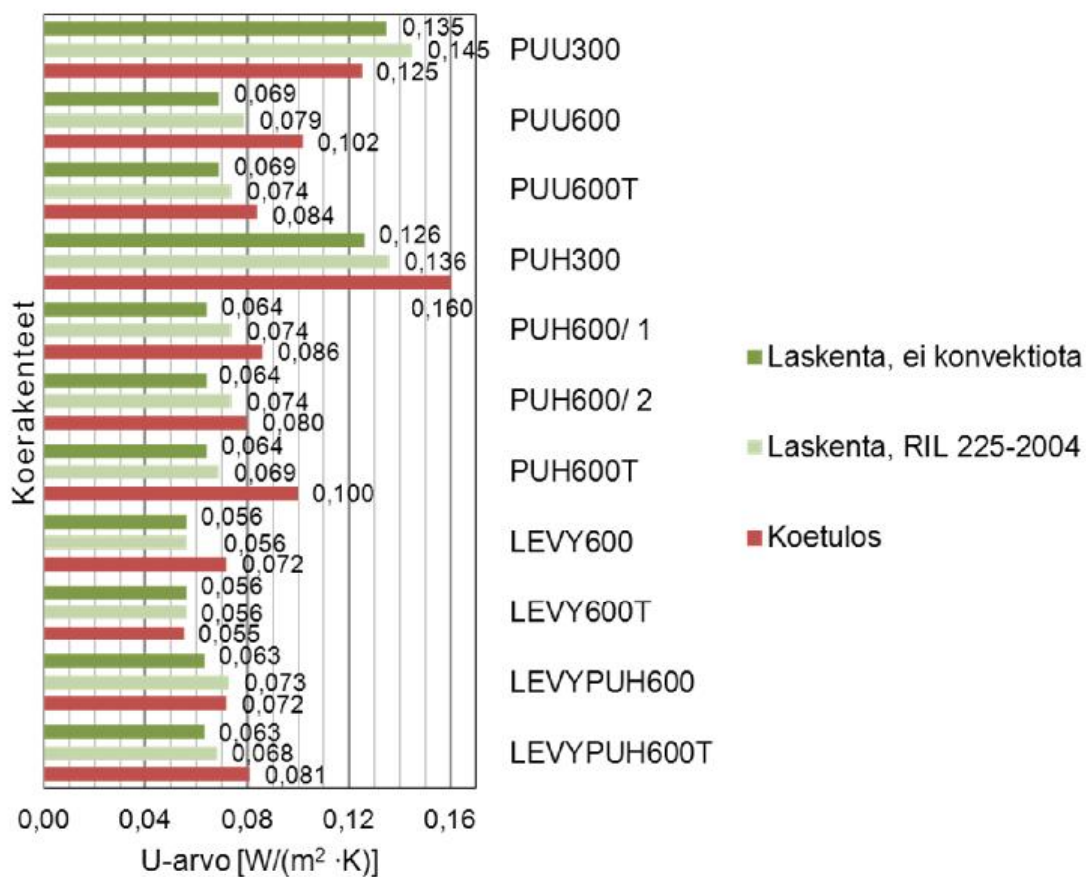
Ulkopinnan pintavastuksen muuttaminen tuulen nopeuden perusteella ei vaikuta merkittävästi lämmönläpäisykertoimeen rakenteissa, joiden U-arvo on alle 0,15 W/(m²·K) vaan vaikutus on merkittävä U-arvon ollessa yli 0,2 W/(m²·K) eli lämmöneristekerroksen paksuuden ollessa noin 150 ... 200 mm. Kun lämmönläpäisykerroin on alle 0,08 W/(m²·K), ei tuulen nopeudella ole vaikutusta teoriassa. Kuvassa 6.2.2 on esitetty koerakenteen lämmönläpäisykerroin ulkopinnan suuntaisen laminaarisen ilmavirtauksen vaikuttaessa.

Taulukossa 6.2.1 on esitetty keskiarvoina PUU600, PUH600, LEVY600 ja LEVYPUH600 koerakenteiden kokeellisesti mitatun lämmitystehon perusteella määritetyt lämmönläpäisykertoimen arvot. Vastaavasti on esitetty tyvek – tuulensuojakankaalla ulkopinnasta suojattujen koerakenteiden U-arvojen keskiarvo (ulkopinta tuulensuojattu). Ilmavirtauksen nopeudella ei ole teoriassa vaikutusta lämmönläpäisykertoimeen näissä rakenteissa.

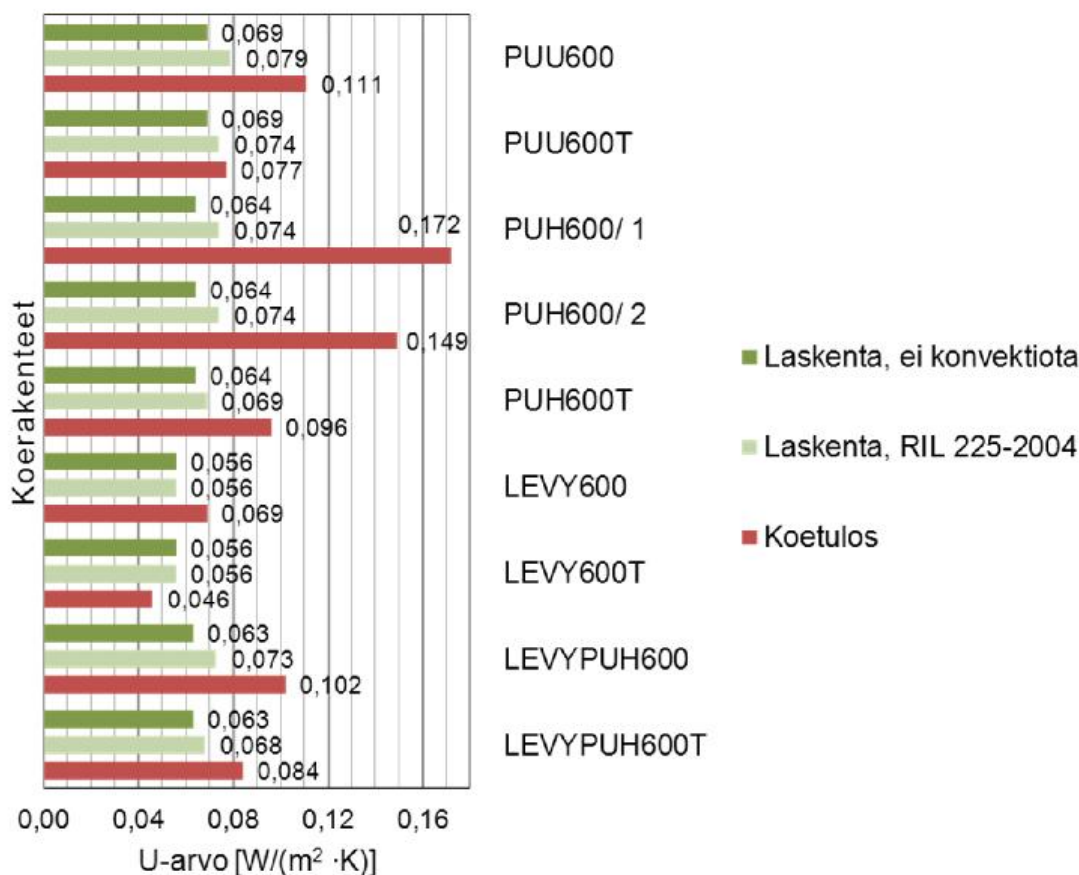
Taulukko 6.2.1 Taulukossa on esitetty 600 mm puhalluseristeillä toteutettujen rakennekokeiden keskimääräiset U-arvot eristeen ulkopinnan ollessa avoin ja tuulensuojalla katettu.

Koevaihe	U _{keskiarvo} -arvo [W/(m ² ·K)] ulkopinta avoin	U _{keskiarvo} -arvo [W/(m ² ·K)] ulkopinta tuulensuojattu
1. vaihe: Tuulettamaton tilanne	0,075	0,078
2. vaihe: Laminaarinen ilmavirtaus ulkopinnassa	0,082	0,080
3. vaihe: Turbulenttinen ilmavirtaus ulkopinnassa	0,108	0,076

Taulukosta 6.2.1 voidaan havaita tuulensuojan vaikutus koerakenteen U-arvoon turbulenttisen eli eristeen ulkopintaa vastaan kohtisuoraan puhaltavan ilmavirtauksen vaikuttaessa. Tuulensuoja estää kylmän ulkoilman tunkeutumisen eristeen huokosiin. Lämpötilakenttiä tarkastelemalla (PUH600 koerakenne) voidaan todeta päältä kohtisuoraan puhaltavan ilmavirtauksen laskevan lämpötilan 0 °C 150 mm etäisyydellä eristeen sisäpinnasta, kun vastaavasti tuulensuojan ollessa 600 mm paksuisen eristekerroksen ulkopinnassa turbulenttisen ilmavirtauksen aikana 0 °C raja on 400 mm etäisyydellä eristeen sisäpinnasta (liite 1, s.14, 16). Tuulensuojatussa huokoisessa eristekerroksessa ulkopuolinen pakotettu konvektio ei pääse syrjäyttämään tasaista lämpötilajakamaa eristeessä ja sitä kautta lisäämään lämpötehon kulutusta. Yksittäisistä tuloksista LEVY600 ja LEVY600T koerakenteiden lämmönläpäisykertoimet eivät juuri kasva ulkopuolisen ilmavirtauksen vaikuttaessa.



Kuva 6.2.2 Koerakenteiden lämmönläpäisykertoimet, kun eristeen ulkopinnan suuntainen ilmavirtaus ($n \leq 0,59$ m/s) vaikutti lämmöneristeeseen koevaiheessa 2.



Kuva 6.2.3 Koerakenteiden lämmönläpäisykertoimet, kun lämmöneristeen ulkopintaa vastaan kohtisuoraan puhaltava ilmavirtaus ($n \geq 1,76$ m/s) vaikutti lämmöneristeeseen koevaiheessa 3.

Kokeellinen U-arvon määrittäminen perustui lämpövirtaan tutkittavan rakenteen läpi (W) ja kokonaislämpötilaeroon (°C, K). Verrattaessa koetuloksia laskennallisiin U-arvoihin, voidaan todeta lähes kaikkien kokeellisten U-arvojen olevan suurempia kuin vastaavat teoreettiset lämmönläpäisykertoimet. Ilmanläpäisevyyden huomioiva lisäystermi U-arvoon on liian pieni eikä ota huomioon sisäisen konvektion aiheuttamaa lisälämpövirtaa eristeessä tutkimuksen perusteella. Tavanomaisessa tilanteessa (koevaihe 2) tuulensuojakalvon käyttö eristeen yläpinnassa pienensi U-arvoa lasivillalevyeristeessä ja puhalletussa puukuitueristeessä tehtyjen kokeiden perusteella, mutta vastaavasti sisäinen konvektio lisääntyi puhalletusta lasivillasta tehdyssä eristyksessä. Jos tarkastellaan eristekerroksissa esiintyneitä lämpötilaeroja, kuvissa 6.1.2 ... 6.1.6 havaitaan, että lämpötilaerot olivat kuitenkin tuulensuojalla peitetyissä puhalluslasivillaeristeissä oleellisesti pienemmät kuin ilman tuulensuojaa olevissa vastaavissa eristyksissä. Näin ollen, lämpötilaerosta ei voida aina arvioida, missä rakenteissa konvektiovirtausten vaikutukset U-arvoon ovat suurimmat.

Yksi teoria tuulensuojalla suojatun puhalluslasivillaeristykseen suuremmalle U-arvolle voi olla tuulensuojan alla kehittyvä häiriötön sisäinen konvektiokierto. Tämä kuljettaa lämpöä tehokkaasti sisäpinnasta ulkopintaan. Ilman tuulensuojaa olevissa rakenteissa

ulkopinnan ilmavirtaukset voivat mahdollisesti sekoittaa ilman virtausreittejä ja painesuhteita siten, että sisäisen konvektion vaikutus U-arvoon on vähäisempi. Lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden pienentyessä sisäisen konvektion vaikutus tuulensuojan sisäpuolella alkaa vähentyä, jolloin tuulensuojan lisääminen parantaa rakenteen U-arvoa. Tämän asian toteaminen vaatisi kuitenkin lisätutkimusta.

Lasivillalevyn (LEVY) ilmanläpäisevyys on pienin kokeessa mukana olleista lämmöneristeistä. Puukuitueristeen (PUU) ilmanläpäisevyys oli lähes viisinkertainen lasivillalevyn vastaavasta ilmanläpäisevyyden arvosta. Puukuitueristeen (PUU) ilmanläpäisevyys oli 67 % lasipuhallusvillan (PUH) ilmanläpäisevyyden arvosta. Lasipuhallusvillan tiheys oli pienempi ($\rho_{PUH} = 25 \text{ kg/m}^3$) ja se vastasi lähes lasivillalevyn tiheyttä. Kokeen perusteella voitiin todeta lasivillalevyn olevan lämmönjohtavuudeltaan lähimpänä teoreettisen lämmönläpäisykertoimen arvoa. Lasivillalevy oli ilmanläpäisevyydeltään tiivein eristemateriaali kokeessa. Sen rakennekuidut olivat vaakatasossa vähentäen ilmavirtausta vertikaalissa suunnassa lämmöneristeessä.

Lämmöneristeiden sisällä tapahtuvat ilmavirtaukset heikentävät puhalluseristeillä toteutettujen rakenteiden U-arvoja. Puhalluslasivillaeristyksessä, jonka ulkopinnalla on tuulensuojakalvo, (PUH600T) saattaa vaikuttaa häiriötön sisäinen konvektiokierto. Tämä kuljettaa tehokkaasti lämpöä sisäpinnasta ulkopintaan. Puhallusvillan suuri partikkelikoko mahdollistaa ilmavirtausten syntyminen eristekerroksessa. Puhalluslasivillarakenteiden lämpötilakentistä voidaan todeta, että ilman tuulensuojaa olevissa puhalluslasivillaeristyksissä ulkopuolinen ilmavirtaus sekoittaa eristeen sisäistä ilmavirtausta niin, että sisäisen konvektion vaikutus U-arvoon jää pienemmäksi. Lämpövirtaan vaikuttaa pikemminkin pakotettu konvektio eristeen pinnan ollessa avoin.

Puukuitueristeen (PUU600) tiheys oli noin 1,6 -kertainen puhalluslasivillaan nähden. Rakenteen U-arvo kasvoi maltillisemmin kokeen 2. ja 3. vaiheen aikana. Ulkopintaan asennetun tuulensuojakankaan vaikutuksesta koerakenteen U-arvo laski kokeen 2. ja 3. vaiheen aikana tuulettamattoman tilanteen (1. vaihe) arvoa vastaavalle tasolle. Lämpötilakentät ovat liitteen 1 mukaan (s. 23-24) tuulensuojan ollessa lämmöneristeen ulkopinnassa erittäin tasaiset vaiheissa 1-3. Sen sijaan avoimella ulkopinnalla PUU600 eristeen lämpötilakentät muuttuivat tuulettamattomassa tilanteesta eristeen pintaa vastaan kohtisuoran ilmavirtauksen vaiheeseen siten, että 0°C raja siirtyi noin 400 mm korkeudelta sisäpinnasta 200 mm korkeudelle. U-arvo kasvoi 1. vaiheesta 3. vaiheeseen mentäessä 25 %. Puukuitueristeen partikkelikoko on pieni ja tiheys suurempi kuin puhalluslasivillalla.

6.3 Sisäinen konvektio koerakenteissa

Laskennallisen tarkastelun avulla saatiin näkemystä lämmöneristeen tehokkuudesta. Koerakenteiden kokeellisten lämmönläpäisykertoimien arvoja verrattiin RIL 225-2004 (2005) mukaisesti laskettuun koerakennetta vastaavan rakenteen lämmönläpäisykertoimeen. Teoreettista U-arvoa verrattiin koerakenteen läpäisemän lämpövirran perusteella johdettuun kokeelliseen U-arvoon. Koerakenteita vastaavan rakenteen teoreettinen lämmönläpäisykerroin (U_c) laskettiin seuraavasti:

$$U_c = \frac{1}{R_{si} + R_{vaneri} + \frac{d}{\lambda} + R_{se}} + \Delta U_a \quad (6.3.1)$$

missä

R_{si}, R_{se} = pintavastukset [$(m^2 \cdot K)/W$]

R_{vaneri} = vanerin lämmönvastus [$(m^2 \cdot K)/W$]

d = lämmöneristeen paksuus [m]

λ = lämmöneristeen laboratoriossa määritetty lämmönjohtavuus [$W/(m \cdot K)$]

ΔU_a = lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden huomioon ottava korjaustekijä [$W/(m^2 \cdot K)$]

Eristeen ilmanläpäisevyyden huomioivan korjaustekijän arvot olivat 0; 0,005; 0,01 $W/(m^2 \cdot K)$ kokeissa mukana olleilla rakenteilla (RIL 225-2004, 2005). Tämän kokeen perusteella korjaustekijän suuruus ei kuvannut sisäisen konvektion määrää huokoisessa lämmöneristekerroksessa.

Kokeen tehonkulutuksen perusteella määritettiin kokeelliset U-arvot koerakenteille. Rakennekokeissa tutkittavan lämmöneristeen läpi johtuva lämpövirta oli kokonaistehon ja häviötehon erotus. Lämpövirran avulla määritettiin tutkittavan koerakenteen lämmönläpäisykerroin kaavalla 6.3.2.

$$U_{koe} = \frac{\Phi_{koe}}{A \cdot (T_{si} - T_{se})} \quad (6.3.2)$$

missä

U_{koe} = koerakenteen lämmönläpäisykerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]

Φ_{koe} = tutkittavan koerakenteen läpäisemä lämpövirta [W]

A = tutkittavan koerakenteen pinta-ala [m^2]

$T_{si, se}$ = koerakenteen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpötila [$^{\circ}C, K$]

Tehonkulutuksesta johdettu rakenteen U-arvo oli kahta koetta lukuun ottamatta keskimäärin tuulettamattomassa tilanteessa 11 %, eristeen pinnan suuntaisen ilmavirtauksen vaikuttaessa 18 % ja lämmöneristeen pintaa vastaan kohtisuoran ilmavirtauksen vaikuttaessa 32 % suurempi kuin teoreettinen U-arvo vastaavalla

rakenteella. Tämä tuki käsitystä, ettei ilmanläpäisevyyden huomioiva U-arvon korjaustermi ollut riittävä kuvaamaan todellista lämmönläpäisykerrointa avohuokoisilla lämmöneristeillä (Vinha et al. 2008).

Tutkimuksen 2. osan lopuksi tehtiin kaksi koetta 300 mm paksuilla puhallettavilla puukuitu- ja lasivillaeristeillä. Tuulettumattomassa tilanteessa puhallettavan puukuitueristeen läpäisevän lämpövirran tiheys oli keskimäärin $4,31 \text{ W/m}^2$ kokonaislämpövirran ollessa $6,20 \text{ W}$. Nusseltin luvun arvoksi kokeellisen lämpövirran ja teoreettisen johtumistapauksen suhteeksi laskettiin $0,98$ PUU300 koerakenteelle. Puhallettavan 300 mm paksuisen lasivillaeristeen kokeessa tuulettamattomassa tilanteessa lämpövirran tiheys eristeen läpi oli $5,22 \text{ W/m}^2$ ($\Phi_{\text{koe}} = 7,52 \text{ W}$). Nusseltin luvuksi muodostui $1,26$. Liitteessä 2 on esitetty diagrammit 300 mm paksujen koerakenteiden tuloksista.

Lämmöneristeen läpäisevän lämpövirran perusteella määritettiin rakenteelle Nusseltin luku. Nusseltin luku kuvaa johtumalla ja konvektiolla siirtyvän lämpövirran suhdetta pelkästään johtumalla siirtyvään lämpövirtaan. Kokeessa Nusseltin luku määritettiin sisä- ja ulkopinnan lämpötilaeron ja eristeen läpi kulkevan lämpövirran perusteella. Lämmön siirtyminen johtumalla määritettiin laskennallisesti laboratoriossa määritetyillä lämmönjohtavuuden arvoilla (ks. taulukko 4.1.1) ilman pintavastuksia. Vanerin lämmönjohtavuuden arvona käytettiin $\lambda_{10} = 0,12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Kuvassa 6.3.1 on esitetty Nusseltin luvut eri koerakenteille tutkimuksen 2. osassa.

$$Nu = \frac{\frac{\Phi_{\text{koe}}}{A_{\text{eriste}} \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{se}})}}{R_{\text{vaneri}} + \frac{d_{\text{eriste}}}{\lambda_{10, \text{eriste}}}} \quad (6.3.3)$$

missä

Φ_{koe} = tutkittavan materiaalin läpi johtuva teho [W]

A_{eriste} = tutkittavan materiaalin pinta-ala [m^2]

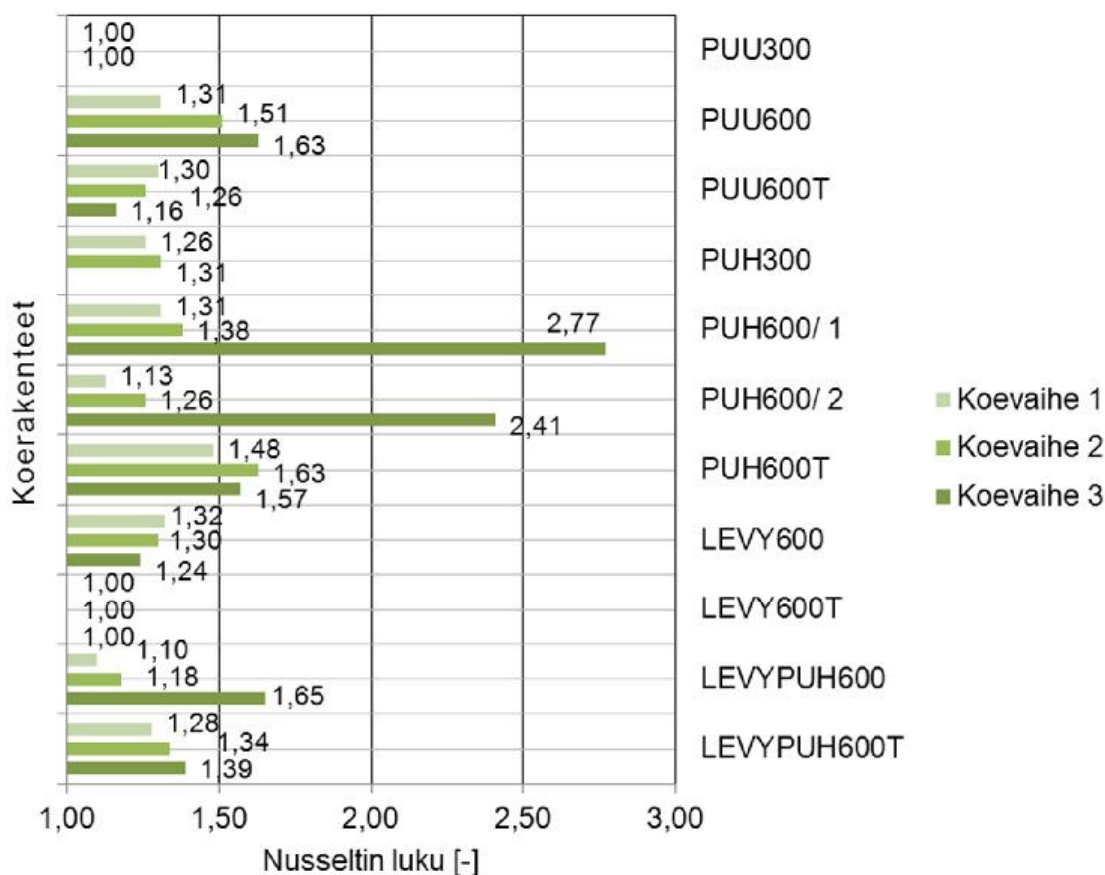
$T_{\text{si, se}}$ = sisäkammion sisäpinnan lämpötila ja eristeen ulkopinnan lämpötila [$^{\circ}\text{C}$, K]

R_{vaneri} = vanerin lämmönvastus [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]

d_{eriste} = tutkittavan eristeen paksuus [m]

$\lambda_{10, \text{eriste}}$ = eristeen mitattu lämmönjohtavuus $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ keskilämpötilassa [$\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$]

Seuraavan kuvan 6.3.1 materiaalien ilmanläpäisevyydet on esitetty taulukossa 4.2.1.



Kuva 6.3.1 Tutkimuksen 2. osassa määritellyt Nusseltin luvut koerakenteille.

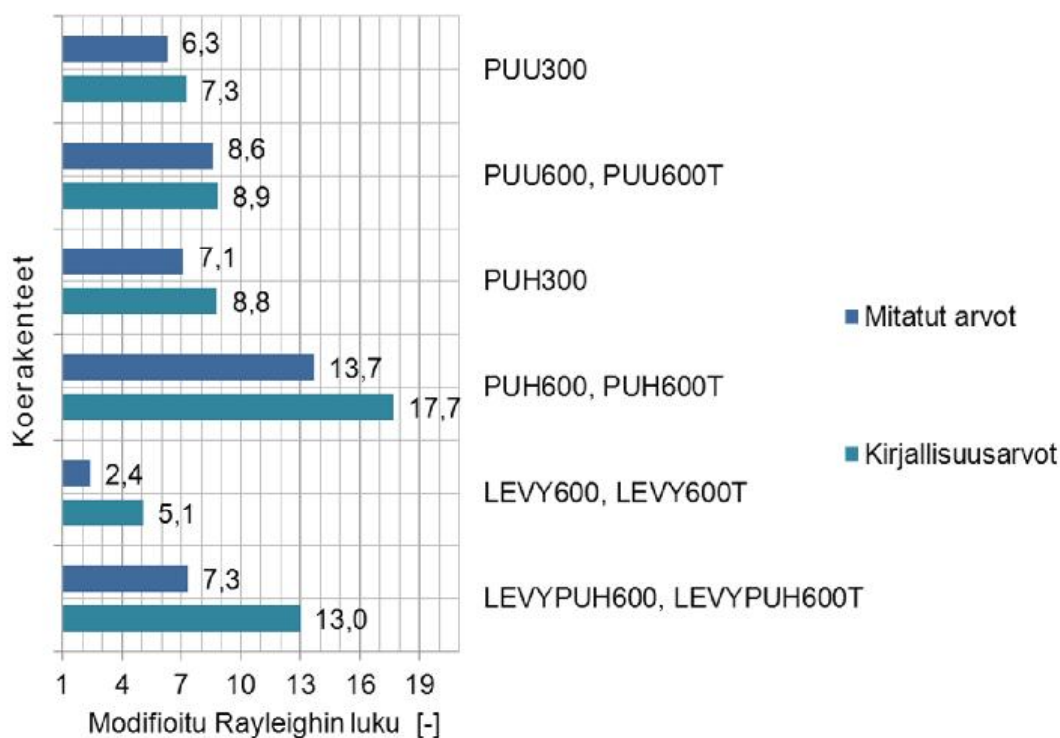
Sisäisen konvektion oletetaan alkavan huokoisessa yläpohjan eristemateriaalissa, kun Nusseltin luku ylittää 1,02...1,04 (Wahlgren 2005). Tässä lukuarvossa on huomioitu varmuutta 0,02 ... 0,04 yksikköä. Yleisesti ottaen sisäinen konvektio alkaa Nusseltin luvun ylittäessä 1,0.

Sisäisen konvektion aiheuttamaa lämmöneristävyyden heikennystä ei ole tehokasta kompensoida lisäämällä lämmöneristyspaksuutta. Tällöin sisäisen konvektion vaikutuksen oletetaan lisääntyvän. Tehokkaampi ratkaisu on kasvattaa eristemateriaalin tiheyttä (Wahlgren 2005). Tiheyden kasvattamisen rinnalla tulee harkita koetulosten perusteella eristemateriaalin ilmanläpäisevyyden pienentämistä. Kosteusteknisesti toimivassa rakenteessa vesihöyrynläpäisevyyden tulee kasvaa sisäpinnasta ulkopintaan mentäessä.

Lämmöneristeen laskennallisen modifioidun Rayleighin luvun suuruus määritettiin koerakenteille, kun huomattiin Nusseltin luvun ylittävän raja-arvon 1,0. Teorian mukaisesti sisäinen konvektio alkoi vaikuttaa horisontaalisesti asennetussa lämmöneristeessä lämmön siirtymiseen vasta, kun $Ra_m \geq 27$ rakenteen pinnan ollessa avoin ja $Ra_m \geq 40$ tuulensuojamateriaalin ollessa rakenteen ulkopinnassa (Hagentoft 2001). Rakenteen sisäpinnassa oli ilmansulkumateriaali. Standardin SFS-EN ISO 10456

(2007) mukaan vastaavat arvot ovat ulkopinnastaan avoimella lämmöneristeellä $R_{a,m} \geq 15$ ja ulkopinnasta tuulensuojatulla lämmöneristeellä $R_{a,m} \geq 30$.

Kaavan 3.2.6 mukaisesti määritettiin modifioitu Rayleighin luku koerakenteiden lämmöneristekerroksille. Kaavan ensimmäisen osan ilman ominaisuudet oli määritetty RIL 225-2004 (2005) mukaan. Materiaaliominaisuuksina käytettiin laboratoriossa mitattuja arvoja lämmönjohtumisen, ilmanläpäisevyyden ja lämpötilaeron osalta.



Kuva 6.3.2 Tutkimuksen 2. osan kokeissa esiintyneiden koerakenteiden modifioidut Rayleighin luvut mitattujen materiaaliarvojen ja kirjallisuudessa esitettyjen materiaaliarvojen mukaisesti.

Kuvan 6.3.2 perusteella kaikissa muissa koerakenteissa tapahtui sisäistä konvektiota paitsi PUU300 ja LEVY600T koerakenteissa. Kuvan 6.3.2 mukaisesti PUU300 koerakenteen kirjallisuudesta määritettynä ilmanläpäisevyytenä on käytetty $500 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Modifioidut Rayleighin luvut ovat yhtä koerakennetta lukuun ottamatta selvästi alle raja-arvojen sisäisen konvektion esiintymisen suhteen. Jotta materiaalit saavuttaisivat modifioidun Rayleighin luvun raja-arvon 27, tulisi ilmanläpäisevyyksien kasvaa moninkertaiseksi. Tämän perusteella tulee pohtia, kuvaavatko asetetut modifioidun Rayleighin luvun raja-arvot sisäisen konvektion vaikutusta huokoisissa eristekerroksessa? Ilmanläpäisevyyden arvo on merkittävin materiaalia kuvaava muuttuja modifioitua Rayleighin lukua määritettäessä. Taulukossa 6.3.1 on esitetty koemateriaalien ilmanläpäisevyyden mittausravot ja raja-arvo, jolla saavutetaan modifioitu Rayleighin luku 15 ja 27.

Taulukko 6.3.1 Modifioidun Rayleighin luvun raja-arvon 15 ja 27 saavuttamiseksi tarvittava ilmanläpäisevyyden arvo 600 mm paksuisille koerakenteille.

Koerakenne	Koe-arvo κ_a [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$] kokeessa mitattu	κ_a [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$] $Ra_m=15$	κ_a [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$] $Ra_m=27$
PUU600	0,000236	0,0004	0,00072
PUH600	0,00035	0,000372	0,00067
LEVY600	0,000052	0,000325	0,000585

Edellä olevan taulukon 6.3.1 mukaisten tavoitearvojen määrittäminen on tehty 600 mm eristepaksuudella ja 50 °C lämpötilaerolla. Lämmönjohtavuuden arvona on käytetty kokeellisesti tässä tutkimuksessa määritettyjä arvoja (ks. taulukko 4.1.1). Ilman viskositeettina on laskennassa käytetty 0 °C lämpötilassa annettua arvoa. Tarkastelu on tehty ulkopinnaltaan avoimelle lämmöneristekerrokselle.

Kuten taulukosta 6.3.1 on havaittavissa, ilmanläpäisevyyden tulisi olla 3 kertaa suurempi kuin laboratoriomittausarvo, jotta puhallettavilla lämmöneristeillä saavutetaan raja-arvo $Ra_m \geq 27$. Edellä esitettyjä modifioidun Rayleighin luvun raja-arvoja käytetään vaakarakenteissa, joissa lämpö liikkuu vertikaalisuunnassa.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeellisesti tarkasteltuna sisäistä konvektiota tapahtui lähes kaikissa avohuokoisilla lämmöneristeillä toteutetuissa koerakenteissa. Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteita. Yläpohjan rakennekokeet tehtiin avohuokoisilla 300 mm ja 600 mm paksuisilla lämmöneristeillä. Tutkittujen lämmöneristeiden kokeellinen lämmönläpäisykertoimen arvo poikkesi teoreettisesta arvostaan keskimäärin +11 % tuulettamattomassa tilanteessa, +18 % laminaarisen ilmapinnan vaikuttaessa ulkopinnalla ja vastaavasti turbulenttisen ilman virtauksen vaikuttaessa +32 %.

Nusseltin luku kuvaa sisäisen konvektion vaikutusta avohuokoisessa eristekerroksessa. Tutkimuksessa määritettiin lämpötehon ja lämpötilaeron avulla Nusseltin luku tutkituille lämmöneristeille. Tuulettamattomassa tilanteessa keskimääräinen Nusseltin luku kaikkien koerakenteiden otoksessa oli 1,24 eli 24 % lämpövirrasta siirtyi sisäisen konvektion vaikutuksesta koerakenteen läpi. Eristeen pinnan suuntaisen ilmapinnan vaikuttaessa eristeen ulkopinnalla Nusseltin luku oli keskimäärin 1,31 ja eristeen ulkopintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttavan ilmapinnan aikana 1,51. Nusseltin lukuun vaikutti eristemateriaalin ilmanläpäisevyys. Lasivillalevyeristeen kohdalla tässä tutkimuksessa saatiin Nusseltin luvuksi 1,0, kun ulkopinnassa oli tuulensuojakalvo.

RIL 225-2004 (2005):ssa on annettu lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden huomioiva lisätermi, joka on kolmiportainen lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden mukaisesti. Tämän tutkimuksen perusteella lisätermin suuruutta tulisi tarkastaa. Kokeen perusteella toteutuneet lämmönläpäisykertoimet olivat pääosin suurempia kuin teoriassa 600 mm lämmöneristepaksuudella, kun lisätermi on otettu huomioon. Lisätermi on vakioarvo, joka ei muutu eristeen paksuuden muuttuessa. Tämä ei ole johdonmukaista, koska modifioitu Rayleighin luku muuttuu eristeen paksuuden muuttuessa. Lisätermin tulisi olla eristeen paksuudesta ja ilmanläpäisevyydestä riippuva.

Nyt toteutetun tutkimuksen 2. osan kaikkien kokeiden laskennallinen keskiarvo modifioidulle Rayleighin luvulle (Ra_m) on 5,2. Näissä kokeissa 87 %:ssa on havaittu teoreettisesta arvosta poikkeavaa lämpötehon kulutusta. Edellä mainituissa arvoissa ei ole huomioitu PUH600/ 1 koerakenteen tulosta. Tulevaisuudessa tulisi tutkia huokoisten eristeiden lämmönläpäisykertoimen muutosta eri ilmanläpäisevyyksillä sekä tarkastella vastaavia Ra_m -arvoja.

Modifioidut Rayleighin luvut olivat yhtä tapausta lukuun ottamatta selvästi alle raja-arvojen 15 ja 30 sisäisen konvektion esiintymisen suhteen. Jotta modifioitu Rayleighin luku olisi saavuttanut raja-arvon 27, ilmanläpäisevyyden arvojen tulisi olla moninkertaisia mitattuihin arvoihin verrattuna. Tämän perusteella tulee pohtia, onko asetetut raja-arvot oikeansuuntaiset. Ilmanläpäisevyyden arvo ja eristeen paksuus olivat merkittäviä muuttujia modifioitua Rayleighin lukua määriteltäessä.

Lämpimän kammion lämmitystehon kulutuksesta johdettu rakenteen U-arvo oli kahta koetta lukuun ottamatta suurempi kuin teoreettinen U-arvo vastaavalla rakenteella. Tämä tukee käsitystä, ettei ilmanläpäisevyyden huomioiva U-arvon korjaustermi ollut riittävä kuvaamaan todellista lämmönläpäisykerrointa avohuokoisilla lämmöneristeillä. Vaadittavan U-arvon saavuttamista ei ole järkevää toteuttaa lämmöneristekerrosta paksuntamalla. Kirjallisuudessa on esitetty puhallettavan lämmöneristeen painumisen kompensoimiseksi suunnitteluarvoon +5 % tai +20 % lisäys lämmöneristepaksuuteen. Tämä menettely ei sovellu sisäisen konvektion aiheuttaman suunnitteluarvosta poikkeavan lämmönläpäisykertoimen korjaamiseksi. Sen sijaan olisi tärkeää katkaista ilman liikkuvuuden mahdollistava ilmatila eristekerroksessa esim. tuulensuojamateriaalilla tai rajoittaa ilman liikkuvuutta lämmöneristekerroksessa vähentämällä lämmöneristeen ilmanläpäisevyyttä. Kokeellisessa tutkimuksessa ei otettu kantaa koerakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Kosteuden tiivistyminen on mahdollista lämmöneristeeseen. Suurempi lämpövirta rakenteen läpi edesauttaa rakenteen kuivumista.

Puhalluspuukuitueristeen läpi johtuvan lämpövirran määrä kasvoi 4,6 W ... 6,2 W (35 %), kun eristekerroksen paksuus muuttui 600 mm ... 300 mm tuulettamattomassa tilanteessa. Vastaavat teoreettiset lämmitystehon määrät olivat 4,0 W ... 7,0 W. Ohuemmalla 300 mm lämmöneristekerroksella oli hyvä tehollinen lämmöneristävyys, kun taas rakenteen sisäpinnan lämpötila on varsin alhainen erityisesti ilmavirtauksen vaikuttaessa ulkopinnalla. Puhalluslasivillaeristeen läpi johtuvan lämpövirran määrä kasvoi 4,1 W ... 7,5 W (83 %), kun eristekerroksen paksuus muuttui 600 mm ... 300 mm tuulettamattomassa tilanteessa. Vastaavat teoreettiset lämpövirran arvot olivat 3,7 W ... 6,7 W. Tuulensuojakalvo toimi 300 mm ja 600 mm eristekerroksen ulkopinnassa lämpötilakenttiä tasaavasti varsinkin ulkopuolisen ilmavirtauksen vaikuttaessa. Tuulensuojakalvon käyttö nosti ulkopinnan lämpötilaa keskimäärin 1 °C verran verrattuna avoimeen ulkopintaan.

Standardissa SFS ISO/DIS 8990 on esitetty lämmönläpäisylaitteistolle mittaausepävarmuusvaatimus $\pm 5,0$ %. homogeenisiä koekappaleita testattaessa. Standardin mukaan lämmitystehon mittaausepävarmuus saa olla enintään 1,5 % (Vinha 1998). Tutkimuksen 2. osan mittaausepävarmuus kaikissa kokeen vaiheissa oli suurimmillaan n. $\pm 8,0$ %. Koerakenteissa esiintyi sisäisestä konvektiosta johtuvia ilmavirtauksia, joten koerakenteita ei voida pitää homogeenisinä. Kuitenkin asennuksesta johtuvaa epätarkkuutta oli vaikea arvioida. Tämän lisäksi oli huomioitava kokeellisen tutkimuksen perustuvan yksittäisiin kokeisiin. Rinnakkaisilla kokeilla olisi saavutettu parempi näkemys kokeen epävarmuudesta. Liitteessä 3 on esitetty kokeen 2. osan kahden kalibrointikerran ja näissä todetun häviötehon eron vaikutus kokeellisesti määritettyyn U-arvoon ja Nusseltin lukuun. Prosentuaalinen keskimääräinen muutos U-arvoon kokeen 1. vaiheessa oli $\pm 1,9$ %, 2. vaiheessa $\pm 6,2$ % ja 3. vaiheessa $\pm 8,6$ %.

Puhalluseristeet asennettiin käsin kauhalla ripottelemalla tutkimusaukkoon. Puhallettavat eristeet sekoitettiin vispilällä auki ennen tiheyden mittausta. Asennustapa poikkesi todellisesta tilanteesta, jossa eriste puhallettiin pakotetun ilmavirtauksen voimalla rakenteeseen. Tästä saattoi aiheutua virhettä tuloksiin. Virheen määrää oli vaikea arvioida, koska käytössä ei ollut vertailuarvoja koneellisesti puhalletusta lämmöneristekokeesta. Lämmöneristekerroksessa olevien lämpötilan mittaustureiden paikalla pysymisen vuoksi päätettiin lämmöneristeet asentaa käsin.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin materiaaleja yksittäisillä kokeilla. Jotta päästään luotettavampiin lopputuloksiin, tulisi sisäisen konvektion vaikutusta tutkia laajemmin tehden useampia rinnakkaiskokeita. Koesarja toteutettiin laboratoriossa ideaaliolosuhteissa. Todellisissa rakenteissa lämmönläpäisykerroin saattaa muuttua eristeen asennuksesta riippuen, rakenteessa olevien kylmäsiltojen vuoksi tai rakenteen epäjatkuvuuskohdissa vallitsevan epälineaarisen lämmönjohtumisen takia.

8. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa on selvitetty yläpohjan huokoisen lämmöneristekerroksen sisäistä konvektiota ja sen vaikutusta eristeen lämmöneristyskykyyn. Kokeellinen tutkimus suoritettiin kahdessa osassa 600 mm ja 300 mm eristekerroksilla. Tutkimus oli osa laajempaa Future Envelope Assemblies and HVAC solutions –tutkimusta eli Frame –tutkimusta.

Tutkimuksen kokeellinen osuus suoritettiin TTY:n rakennustekniikan laitoksen laboratoriossa. Tutkimuksen ensimmäisessä osassa tutkittiin lämmöneristeen sisäisiä lämpötilakenttiä ja tähän liittyvät kokeet suoritettiin keväällä – kesällä 2011. Tutkimuksen 2. osassa tutkittiin rakenteiden lämmönläpäisykertoimia eli U-arvoja talvella – keväällä 2012. Tutkimuksen 1. osassa tutkittiin 16 eri koerakennetta, joista puolet oli 600 mm paksuja rakenteita. Tutkimuksen 2. osassa tutkittiin 10 koerakennetta, joista 8 oli 600 mm paksuja rakenteita. Lisäksi tehtiin yksi vertailukoe PUH600 eristeellä.

Lasivillalevyeriste oli koostumukseltaan tasainen. Lasivillalevyeristeen ilmanläpäisevyys oli pienin tutkimuksessa olleista lämmöneristeistä. Avoimella ulkopinnalla olevissa lasivillalevyillä toteutetuissa koerakenteissa sisäistä konvektiota esiintyi, kun taas tuulensuojakalvon ollessa lämmöneristyskerroksen ulkopinnassa sisäistä konvektiota ei esiintynyt lasivillalevyeristeessä. Lämpötilakentät olivat lasivillalevyeristeessä tasaisimmat huolimatta ulkopinnalla vaikuttavasta ilmavirtauksesta sekä 300 mm että 600 mm kerrospaksuudella. Tuulensuojakalvon käyttö eristeen ulkopinnassa nosti ulkopinnan lämpötilaa, muttei muuten juuri vaikuttanut lämpötilakenttiin. Tuulensuojakalvon kanssa lasivillalevy rakenne toimi 600 mm paksuisista koerakenteista parhaiten. Lasivillalevyn käyttö yhdistelmäeristeinä puhalluslasivillan kanssa 300 mm kokonaislämmöneristyspaksuudella tasoitti lämpötilakenttiä sekä nosti sisäpinnan lämpötilaa ulkopinnalla tapahtuvan ilmavirtauksen vaikuttaessa. Vastaavasti 600 mm lämmöneristekerroksessa 100 mm lasivillalevyeriste puhalluslasivillakerroksen sisäpinnassa ei vaikuttanut lämpötilakenttiin, mutta pienensi kuitenkin sisäisen konvektion vaikutusta koko rakenteen U-arvoa tarkasteltaessa.

Puhalluspuukuitueristeen ilmanläpäisevyys oli suurempi kuin lasivillalevyeristeellä. Eristeen painuma oli selvästi suurempi kuin lasipuhallusvillalla ja eristeen tiheys kasvoi kerrospaksuuden kasvaessa. Puhalluspuukuitueristeen ilmanläpäisevyys oli 300 mm paksuisissa rakenteissa suurempi kuin kirjallisuuslähteissä on esitetty, kun taas 600 mm paksuissa koerakenteissa ilmanläpäisevyys vastasi kirjallisuusarvoja. Lämpötilakentät olivat ulkopinnan suuntaisen ja ulkopintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttavien ilmavirtausten vaikuttaessa epätasaiset. Koetulosten mukaan sisäistä konvektiota tapahtui 600 mm paksuisissa puhalluspuukuitueristeellä tehdyissä koerakenteissa, mutta 300 mm paksuisissa rakenteissa sitä ei esiintynyt, vaikka eristeen ilmanläpäisevyys oli

suurempi. Lämmöneristeen pienempi kerrospaksuus ja suurempi lämpövirta eristeen läpi näyttivät vähentävän sisäisen konvektion vaikutusta tässä rakenteessa oleellisesti. Tuulensuojakalvon asennus lämmöneristeen ulkopintaan vähensi sisäistä konvektiota merkittävästi, kun lämmöneristeen ulkopinnalla vaikutti pinnan suuntainen tai pintaa vastaan kohtisuora ilmavirtaus.

Puhalluslasivilla oli raekoostumukseltaan suurempaa ja koossa pysyvämpää kuin puhalluspuukuitueriste. Eristeen asennuksen yhteydessä sekä ohuempi että paksumpi eristekerros voitiin toteuttaa valmistajan ilmoittamalla asennustiheydellä. Puhalluslasivillaeristeen ilmanläpäisevyys oli kokeissa suurempi kuin 600 mm paksun puhalluspuukuitueristeen ilmanläpäisevyys. Puhalluslasivillarakenteiden lämpötilakentät olivat epätasaiset (ks. liite 1). Tämä johtui lämmöneristeen suuresta ilmanläpäisevyydestä sekä silminnähden eristeen huokoisuudesta. Tuulensuojakalvon käyttö lämmöneristekerroksen ulkopinnassa tasoitti lämpötilakenttiä sekä 300 mm että 600 mm paksuisissa eristekerroksissa. Sen sijaan sisäisen konvektion vaikutus ei näyttänyt vähentyvän lämmöneristekerroksessa vaan se kasvoi.

Yhdistelmäeristystä tutkittiin lasivillalevyeristeen ja puhalluslasivillaeristeen yhdistelmänä. Ohuemman 300 mm eristyksen sisäpinnassa 100 mm paksun lasivillalevyn vaikutus lämpötilakenttiin näkyi selvästi liitteen 1 tuloksissa. Lasivillalevyn lämmönjohtavuus oli kokeellisesti määriteltynä 15 % pienempi kuin puhalluslasivillaeristeen. Lämpötilakentissä ei havaittu suurta muutosta 600 mm kokonaiseristepaksuudella, kun sisäpinnassa oli 100 mm levylasivilla. Koetulosten perusteella 600 mm eristyspaksuudella rakenteen lämmöneristyskykyä voidaan parantaa tuntuvasti lisäämällä lasivillalevyn määrää sisäpinnassa $1/3 \dots 1/2$ eristeen kokonaispaksuudesta. Tällöin voidaan eliminoida ulkopuolisen ilmavirtauksen vaikutusta eristeen lämpötilakenttiin ja pienentää rakenteen lämmönläpäisykerrointa. Rakenteen kosteustekninen toiminta tulee tarvittaessa varmistaa, koska lämmöneristyskyvyn parantamisella vähennetään lämpövirran kuivattavaa vaikutusta eristeen ulko-osassa.

Sisäinen konvektio lisäsi tuulensuojaamattomien 600 mm paksujen puhalluseristeiden läpi siirtyvää lämpövirtaa 26 % lasivillaeristeessä ja 51 % puukuitueristeessä, kun ulkopinnalla vaikutti pinnan suuntainen ilmavirtaus. Vastaava lämpövirran lisäys 300 mm paksuisissa lasivillaeristeissä oli 31 %, mutta 300 mm puukuitueristeessä konvektion vaikutusta ei havaittu. Sisäisen konvektion vaikutus oli suurempi 600 mm paksuisessa puukuitueristeessä, vaikka eristeen ilmanläpäisevyys oli pienempi sekä tiheys suurempi kuin puhalluslasivillalla. Näistä tuloksista voidaan havaita, että muutkin tekijät ilmanläpäisevyyden ohella, kuten ulkopinnalla tapahtuva ilmavirtaus ja eristeessä olevat onkalot vaikuttavat sisäisen konvektion määrään. Tutkimuksessa ei tutkittu suoranaisesti kylmäsiltojen ja eristeen epäjatkuvuuskohtien merkitystä sisäisen konvektion voimakkuuteen, mutta koetulokset viittaavat siihen, että edellä mainituilla tekijöillä on sisäisen konvektion määrään vaikuttava efekti. Myös upotettavat

kattovalaisimet voivat voimistaa konvektiokierron aikaansaavia lämpötilaeroja, kuten tutkimuksen 1. osassa havaittiin. Sisäisen konvektion vaikutus on tässä tutkimuksessa selvästi nähtävissä varsinkin 600 mm paksuilla puhalluslämmöneristeillä eristetyissä koerakenteissa.

Modifioidun Rayleighin luvun (Ra_m) avulla voidaan arvioida lämmöneristekerroksessa tapahtuvan sisäisen konvektion voimakkuutta. Kaikki tutkitut koerakenteet yhtä lukuun ottamatta alittivat nykyiset modifioidun Rayleighin luvun raja-arvot yläpohjarakenteille, jolloin niissä ei pitänyt esiintyä sisäistä konvektiota. Tästä huolimatta lähes kaikissa koerakenteissa esiintyi mitattujen lämpövirtojen perusteella sisäistä konvektiota lämmöneristeessä. Koetulosten perusteella sekä avoimen että tuulensuojalla ulkopinnastaan suojatun yläpohjarakenteen modifioidun Rayleighin luvun tulisi olla pienempi kuin 5,0, jotta 600 mm lämmöneristekerroksissa ei tapahtuisi merkittävästi sisäistä konvektiota.

Koejärjestelyyn liittyi mittausepävarmuutta. Laitteiston mittaustarkkuuden lisäksi tuloksiin vaikuttivat mm. lämmöneristeiden asennus tutkimusaukkoon sekä materiaaliominaisuuksien mittaukseen liittyvät epävarmuudet.

Tutkimustulokset osoittavat, että 600 mm puhalluseristeillä tehdyissä yläpohjan lämmöneristyksissä sisäinen konvektio voi lisätä merkittävästi koerakenteiden läpi siirtyvän lämpövirran määrää. Tätä ilmiötä voidaan vähentää parhaiten pienentämällä lämmöneristeen ilmanläpäisevyyttä ja asentamalla mahdollisimman tasalaatuinen lämmöneristekerros. Ilmanläpäisevyyttä voidaan pienentää lämmöneristeen tiheyttä kasvattamalla tai lisäämällä lämmöneristeeseen sidosainetta. Sisäisen konvektion määrää voidaan vähentää myös korvaamalla osa puhallettavasta lämmöneristeestä levyeristeellä tai toteuttamalla lämmöneristys kokonaan levyeristeellä.

LÄHTEET

Internet –lähteet:

Aittomäki, Antero. 2009. Teknillinen termodynamiikka. Prosessit ja energian muutokset. 2009. 104 s. TTY:n kurssin Teknillinen termodynamiikka –luentomoniste. Viitattu [23.10.2011] Saatavilla: <http://www.tut.fi/units/me/ener/kurssit/ENER-2060/Termodynamiikka.pdf>

Ciucasu, C., Gilles, J., Montoya, E. & Arquís, E. 2005. Convection phenomena in Loose-fill Attics. Saint-Gobain Insulation. Ranska. 8 s. Viitattu [02.08.2012]. Saatavilla: http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_080.pdf

Jahkonen, Jaana. 2009. LED-valaisimen jäähdytys. Teknillinen Korkeakoulu. Espoo. Diplomityö. s. 98. Viitattu [31.07.2012]. Saatavilla: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3042/urn100001.pdf?sequence=1>

Kristillisdemokraatit ry. 2011. Kristillisdemokraattien energiaohjelma 2011. Viitattu [23.07.2012]. Saatavissa: http://www.kd.fi/KD/www/fi/liitetiedostot/ohjelmat/kdn_energiaohjelma.pdf

K. Mizohata, V. Palonen, M. Peura, E. Rauhala, B. Ståhlberg ja K. Österberg. 2010. Aineopintojen laboratoriotyöt. Helsingin Yliopisto. Fysiikan laitos. 2010. Viitattu [23.07.2012] Saatavilla: <http://www.physics.helsinki.fi/courses/p/oplab/aineopinnot/monisteet/cumu.pdf>

Motiva 2011. Matalaenergiatalon määritelmiä. Viitattu [23.07.2012]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/rakentaminen/millainen_on_energiatehokas_pientalo/matalaenergiatalon_määritelmiä

Pakkanen, Tomi. 2011. Yläpohjarakenteiden konvektio ilmiönä ja sen muuttuminen eristepaksuuden kasvaessa. 01.12.2011. Viitattu [05.02.2012]. Saatavilla: http://www.rakennusteollisuus.fi/frame/Pakkanen_T._Yläpohjien_sisäinen_konvektio_01122011.pdf

Kirjallisuuslähteet:

Bejan, Adrian. 1984. Convection heat transfer. Department of mechanical engineering and materials science Duke University Durham, North Carolina. John Wiley & Sons, Inc. 477 s.

Ede, A.J. 1967. An introduction to heat transfer, principles and calculations. University of Aston Birmingham. 287 s.

Hagentoft, C. E. 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur. Lund, 422 s.

ISO 8301. International standard 1991. Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties- Heat flow meter apparatus. International Organization for Standardization. Switzerland. 38 s.

ISO/DIN 8990. International standard 1994. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box. International Organization for Standardization. Switzerland. 23 s.

ISO 9053. International standard 1991. Acoustics – Materials for acoustical applications – Determination of airflow resistance. International Organization for Standardization. Switzerland. 16 s.

ISO/ FDIS 10456. International standard 2007. Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. International Organization for Standardization. Switzerland. 33 s. Saatavilla: http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docentist/Fabio-Pero/materiali-/corso-tecn1/_mat-_ISO_FDIS-10456--dati-materiali.pdf

Kohonen, R., Ojanen, T. 1987. Coupled diffusion and convection heat and mass transfer in building structures. Building physics Symposium, Lund. Artikkel. s. 247-251.

Kokko, E, Ojanen, T. & Salovaara, M. 1997. Uudet vaipparakenteet, Energian säästö ja kosteustekniikka. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 1869. 90 s.

Mills, Anthony F. 1995. Heat and mass transfer. University of California at Los Angeles. IRWIN. 1240 s.

RIL 225-2004. 2005. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta, ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Helsinki, DARK Oy. 115 s.

RakMK C3. 2003. Lämmöneristys, määräykset 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 7 s.

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 28 s.

RakMK C4. 2012. Luonnos 23.06.2011. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 47 s.

RakMK D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 35 s.

Shankar, V; Hagentoft, C. E. 2008. A Numerical study of Effect of natural convection on thermal properties on horizontal oriented porous insulation. Chalmers University of technology. Göteborg. Artikkel. 11 s.

Vinha, Juha. 1998. Rakenteiden lämmöneritysominaisuuksien mittauslaitteisto. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tampere. Lisensiaatintutkimus. s. 106 + liites. 17.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. ja Käkelä, P. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. 2005. Rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikka. Tutkimusraportti 129. Tampereen teknillinen yliopisto. s. 101 + liites. 211. Saatavilla: http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/16493/vinha_rakennusmateriaalien_rakennusfysikaaliset_ominaisuudet.pdf.

Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J., Heljo, J., Suonketo, J., Leivo, V., Korpi, M., Aho, H., Lähdesmäki, K. & Aaltonen, A. 2008. Matalaenergiarakenteiden toimivuus, Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tutkimusselostus N: o 1706. s. 88.

Vinha, Juha. 2011. Rakennusfysiikka RTEK-3510. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste kevät 2011 osa 1.

Wahlgren, Paula. 2001. Convection in Loose-fill Attic Insulation. Chalmers University of technology. Göteborg. ISBN 9172910798. 32 s.

Wahlgren, Paula. 2005. Variation in onset of natural convection in loose-fill attic insulation due to geometry and materials. Chalmers University of technology. Göteborg. Artikkel. 8 s. Saatavilla: http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_085.pdf

Wahlgren, Paula. 2006. Survey of measurements and simulations of natural and forced convection in insulation. Chalmers University of technology. Göteborg. Tutkimusraportti. 14 s. Saatavilla: <http://jen.sagepub.com/content/30/4/351.abstract>.

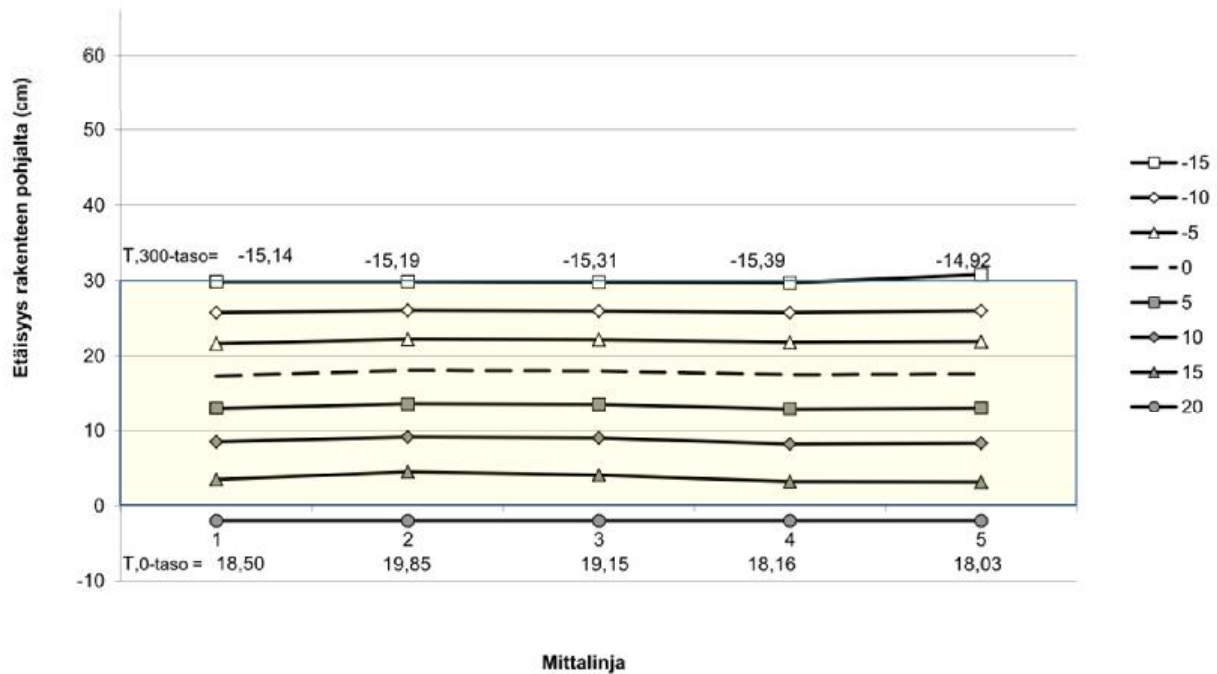
LIITTEET

- LIITE 1 Tutkimuksen 1. osan lämpötilakenttien mittaustulokset
- LIITE 2 Tutkimuksen 2. osan lämmitystehon -, U-arvon kuvaajat ja Nusseltin luvut
- LIITE 3 Kalibrointien perusteella koerakenteille määritetty epätarkkuus, Nusseltin luvut, U-arvot ja häviötehot kokeen vaiheissa.

KOE: LEVY300 Lasivillalevy 30cm
TILA: STABIILITILA $T_e = -15,82\text{ °C}$

AIKA: 27.6.2011 15:49
 $T_i = 20,2\text{ °C}$

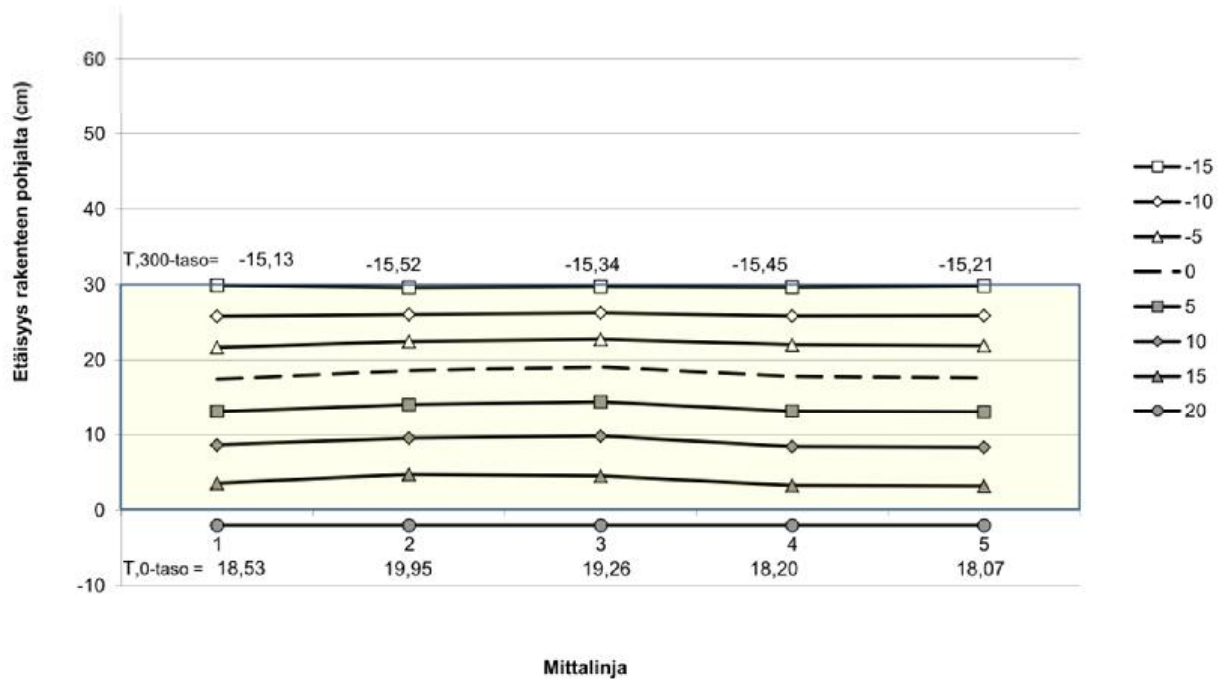
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY300 Lasivillalevy 30cm
TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,62\text{ °C}$

AIKA: 27.6.2011 22:19
 $T_i = 19,5\text{ °C}$

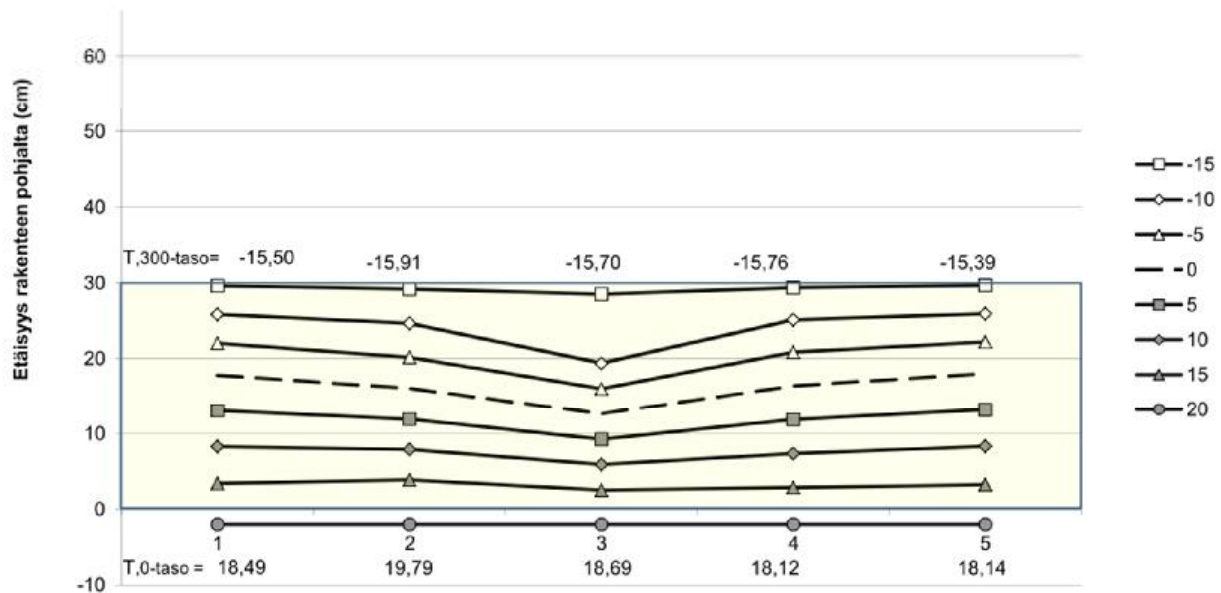
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY300 Lasivillalevy 30cm
 TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,80\text{ °C}$

AIKA: 28.6.2011 6:21
 $T_i = 19,4\text{ °C}$

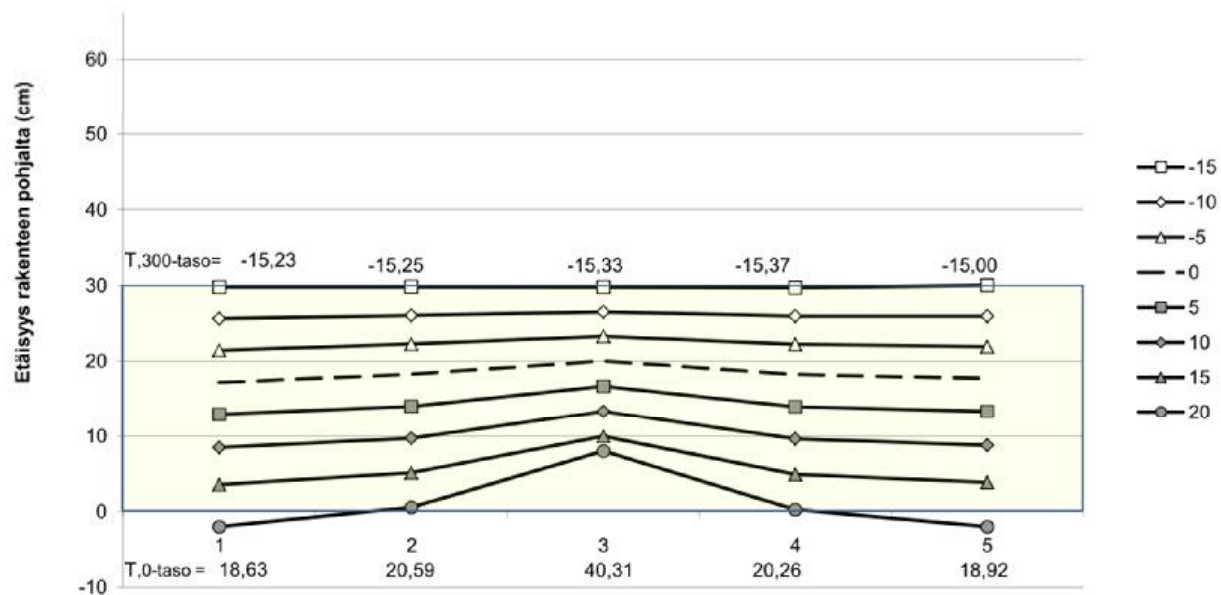
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY300 Lasivillalevy 30cm
 TILA: LAMPPU $T_e = -15,79\text{ °C}$

AIKA: 28.6.2011 16:52
 $T_i = 19,7\text{ °C}$

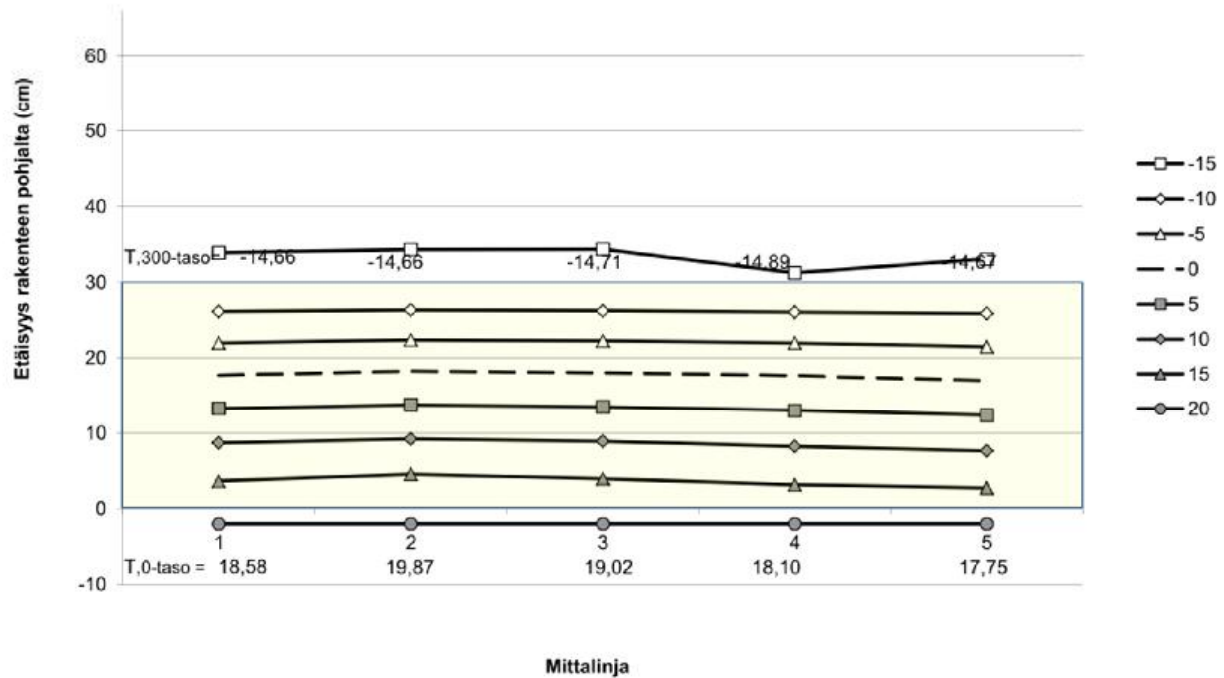
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY300T Lasivillalevy 30cm Tyvek
TILA: STABIILITILA $T_e = -15,57\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 23.6.2011 11:33
 $T_i = 20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

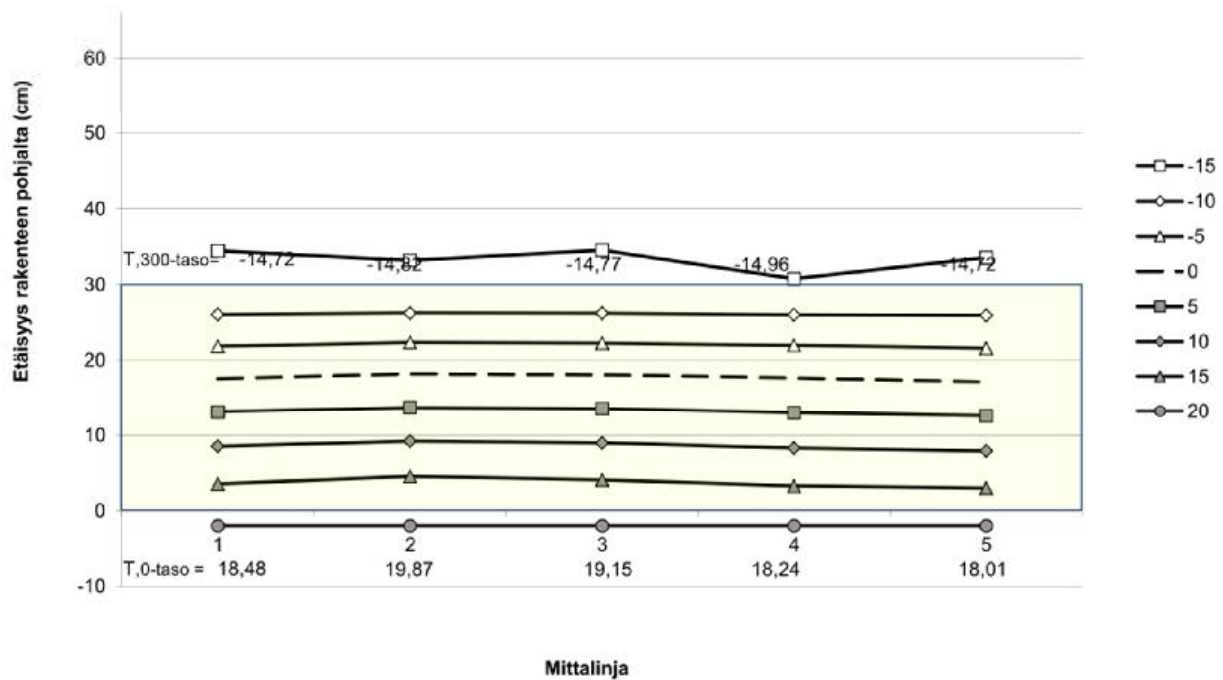
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY300T Lasivillalevy 30cm Tyvek
TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,41\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 23.6.2011 14:49
 $T_i = 19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

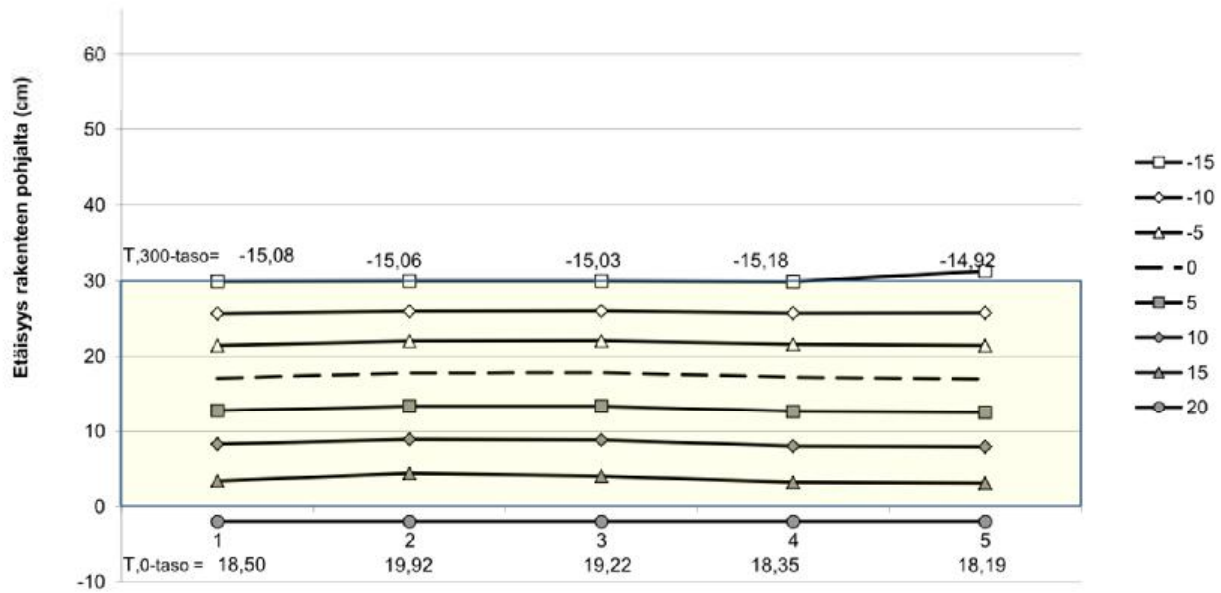


LIITE 1 (4/32)

KOE: LEVY300T Lasivillalevy 30cm Tyvek
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,52\text{ °C}$

AIKA: 23.6.2011 19:49
 $T_i = 19,6\text{ °C}$

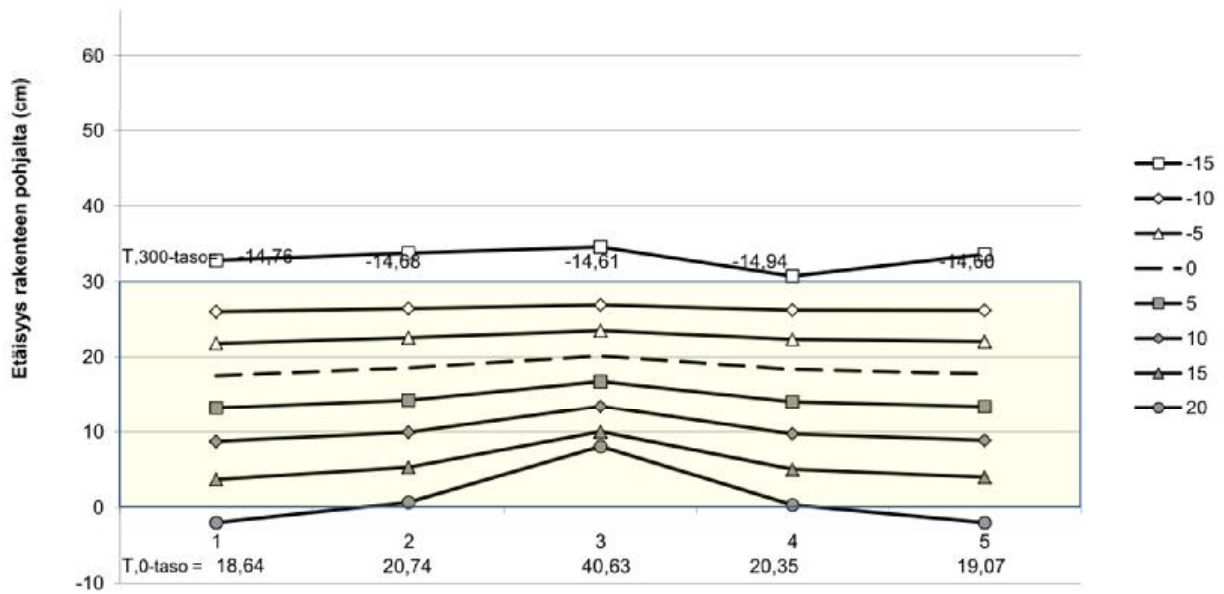
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY300T Lasivillalevy 30cm Tyvek
TILA: LAMPPU $T_e = -15,62\text{ °C}$

AIKA: 24.6.2011 5:11
 $T_i = 20,2\text{ °C}$

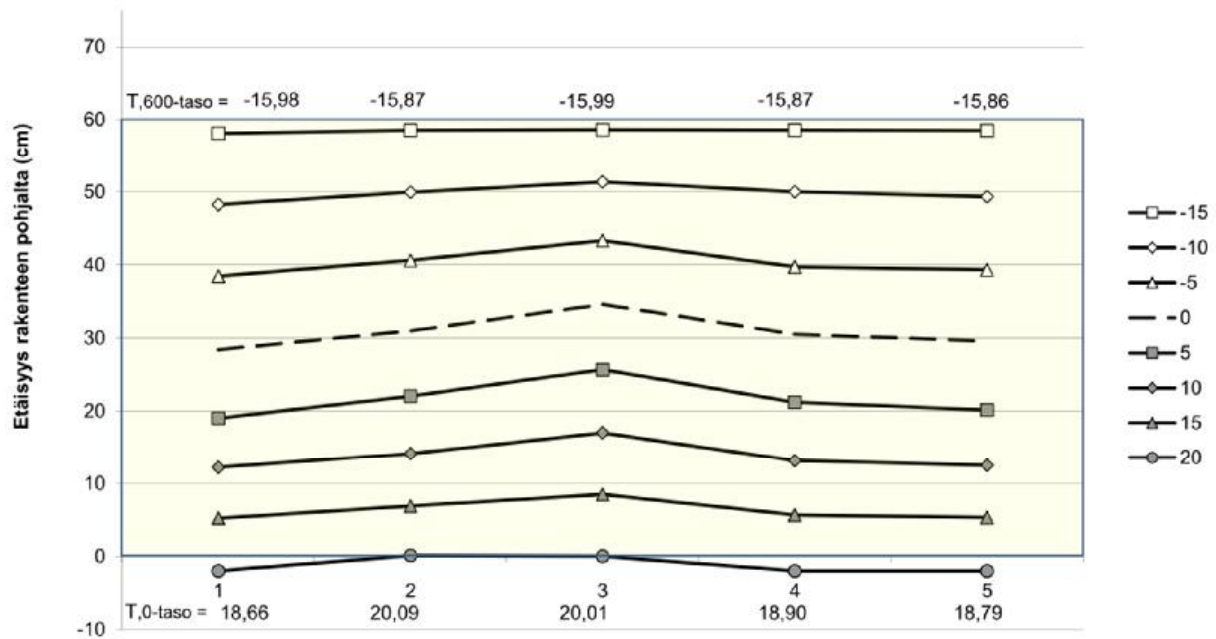
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY600 Lasivillalevy 60cm
TILA: STABIILITILA $T_e = -16,24\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 29.6.2011 3:47
 $T_i = 19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

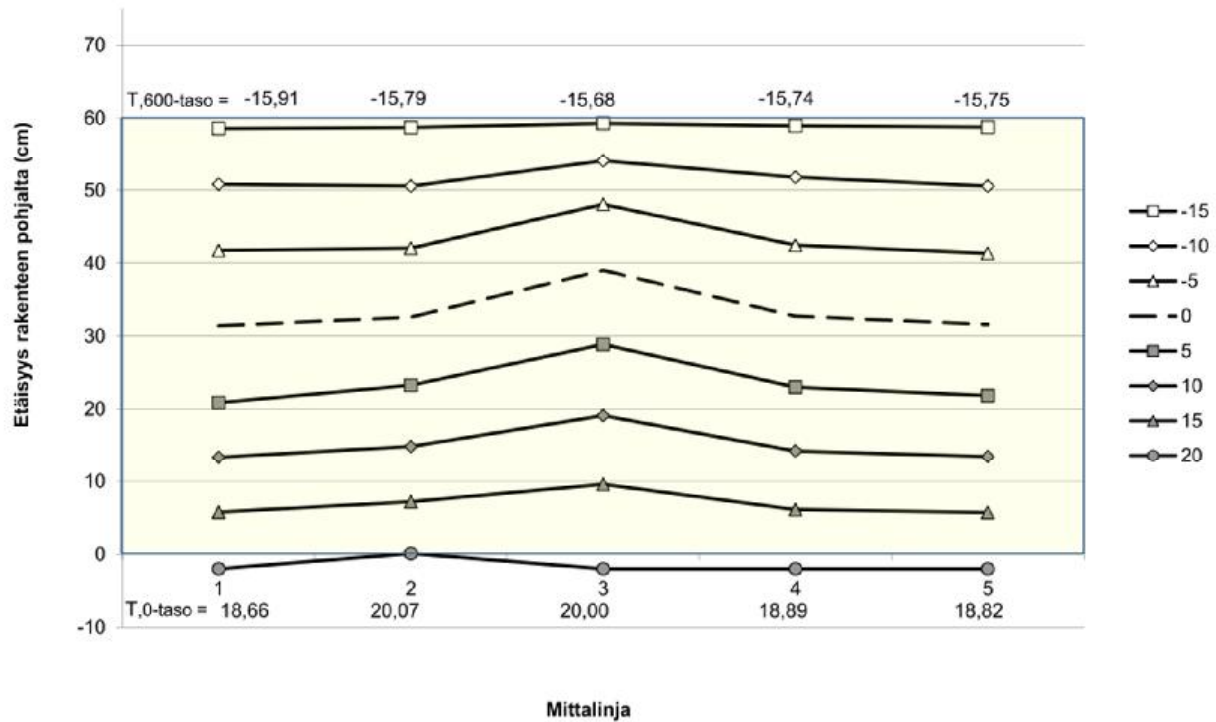
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY600 Lasivillalevy 60cm
TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,94\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 29.6.2011 13:00
 $T_i = 20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



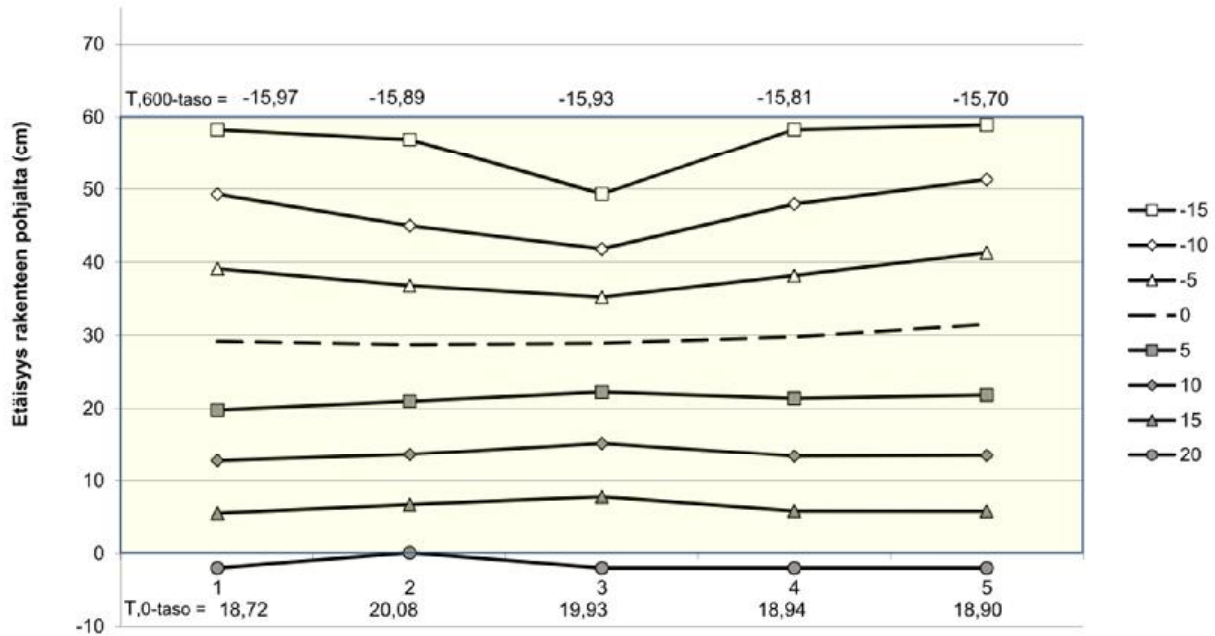
LIITE 1 (6/32)

KOE: LEVY600
TILA: PÄÄLLITUUL

Lasivillalevy 60cm
 $T_{e} = -15,97\text{ °C}$

AIKA: 29.6.2011 22:57
 $T_{i} = 19,5\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

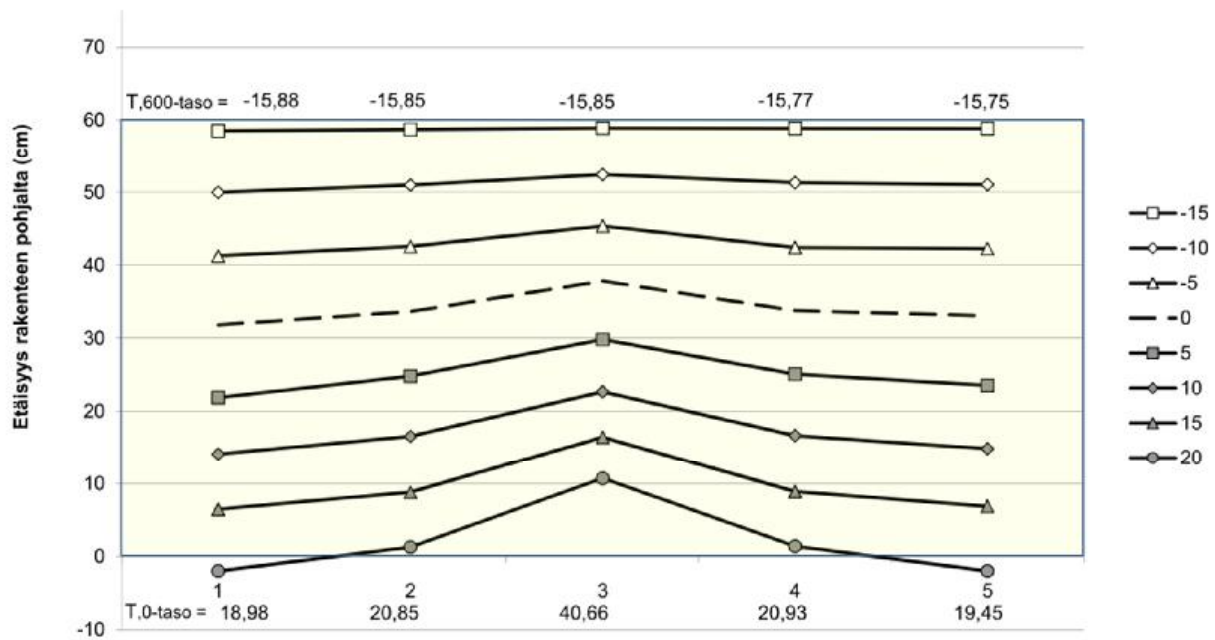


KOE: LEVY600
TILA: LAMPPU

Lasivillalevy 60cm
 $T_{e} = -16,16\text{ °C}$

AIKA: 30.6.2011 13:50
 $T_{i} = 20,2\text{ °C}$

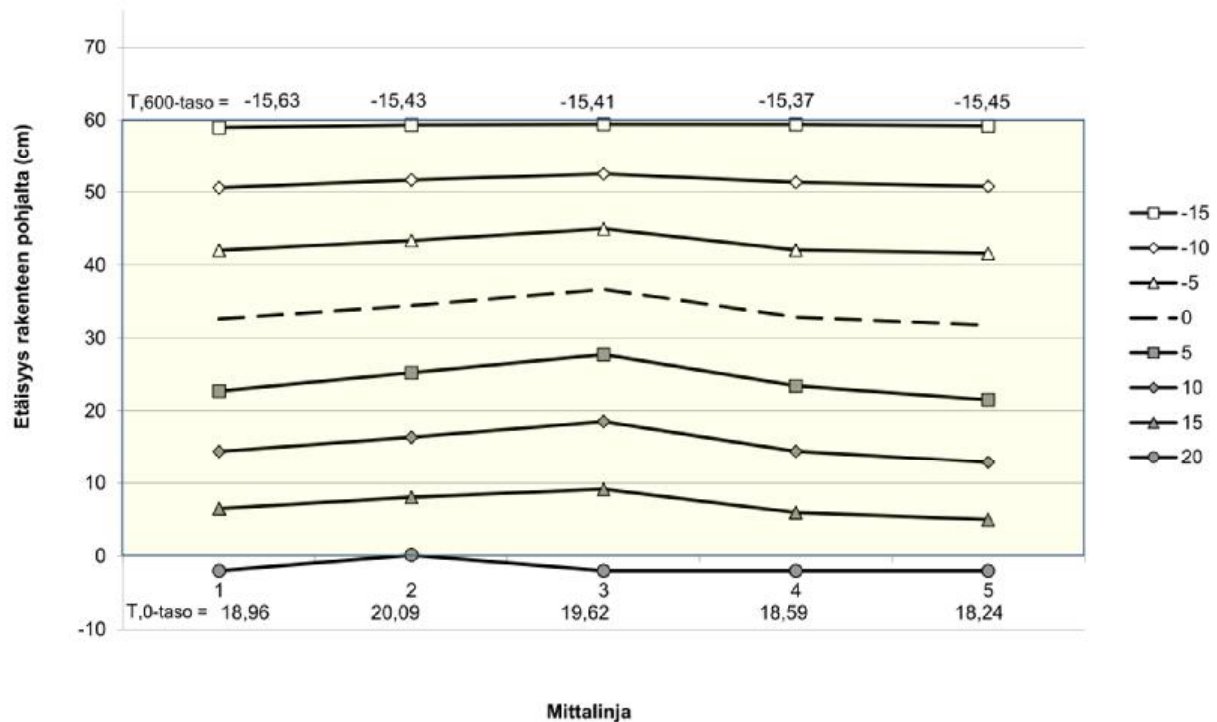
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY600T Lasivillalevy 60cm Tyvek
 TILA: STABIILITILA $T_{e} = -15,96\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 1.7.2011 1:12
 $T_{i} = 20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$

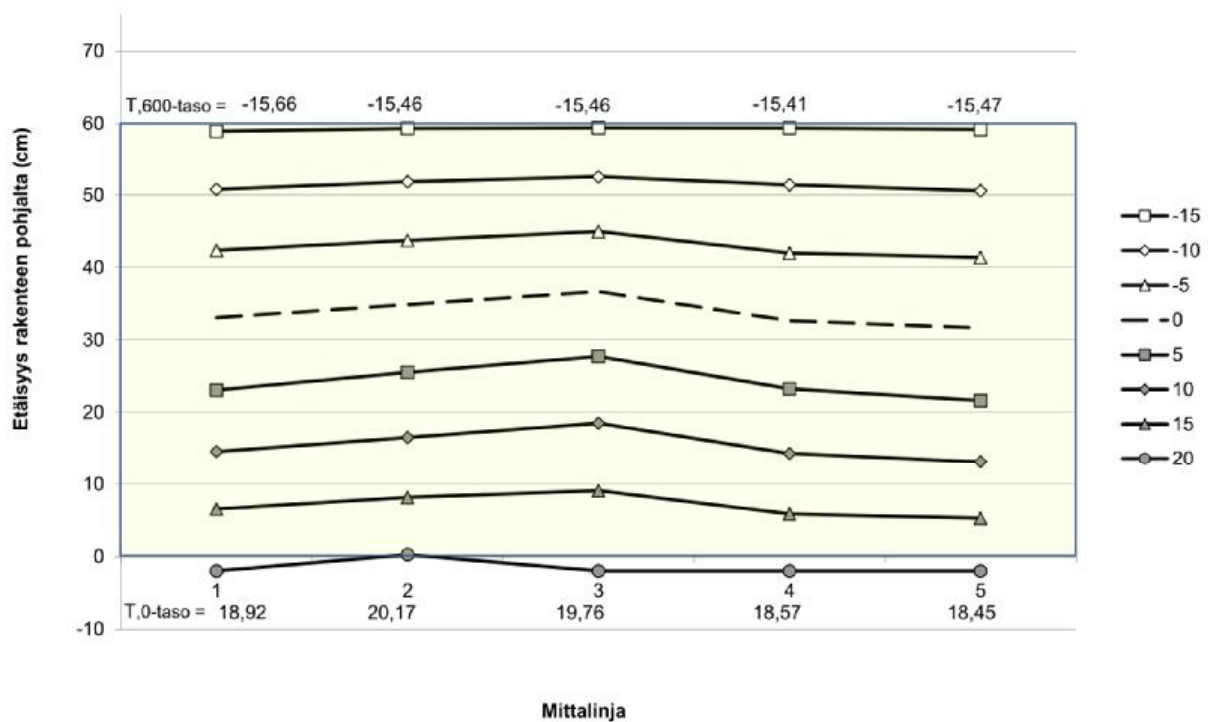
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY600T Lasivillalevy 60cm Tyvek
 TILA: SIVUTUUL $T_{e} = -15,80\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 1.7.2011 5:19
 $T_{i} = 20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

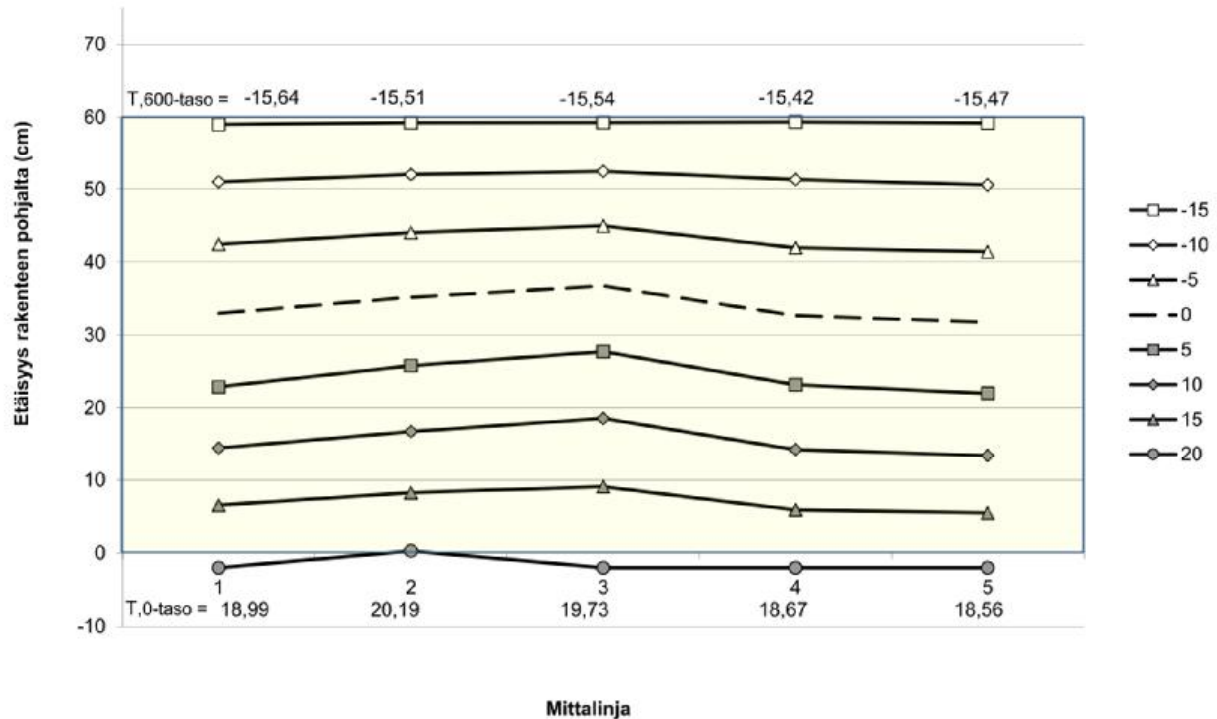


LIITE 1 (8/32)

KOE: LEVY600T Lasivillalevy 60cm Tyvek
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,77\text{ °C}$

AIKA: 1.7.2011 9:08
 $T_i = 19,5\text{ °C}$

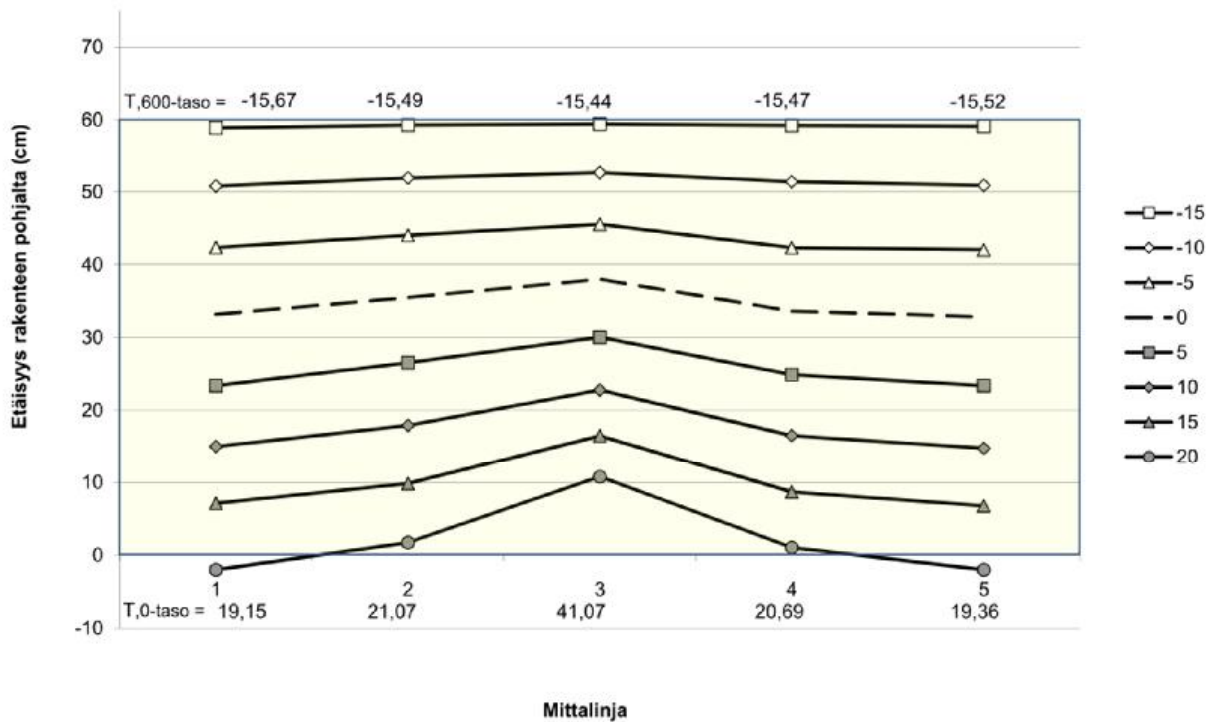
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVY600T Lasivillalevy 60cm Tyvek
TILA: LAMPPU $T_e = -16,02\text{ °C}$

AIKA: 1.7.2011 19:00
 $T_i = 20,3\text{ °C}$

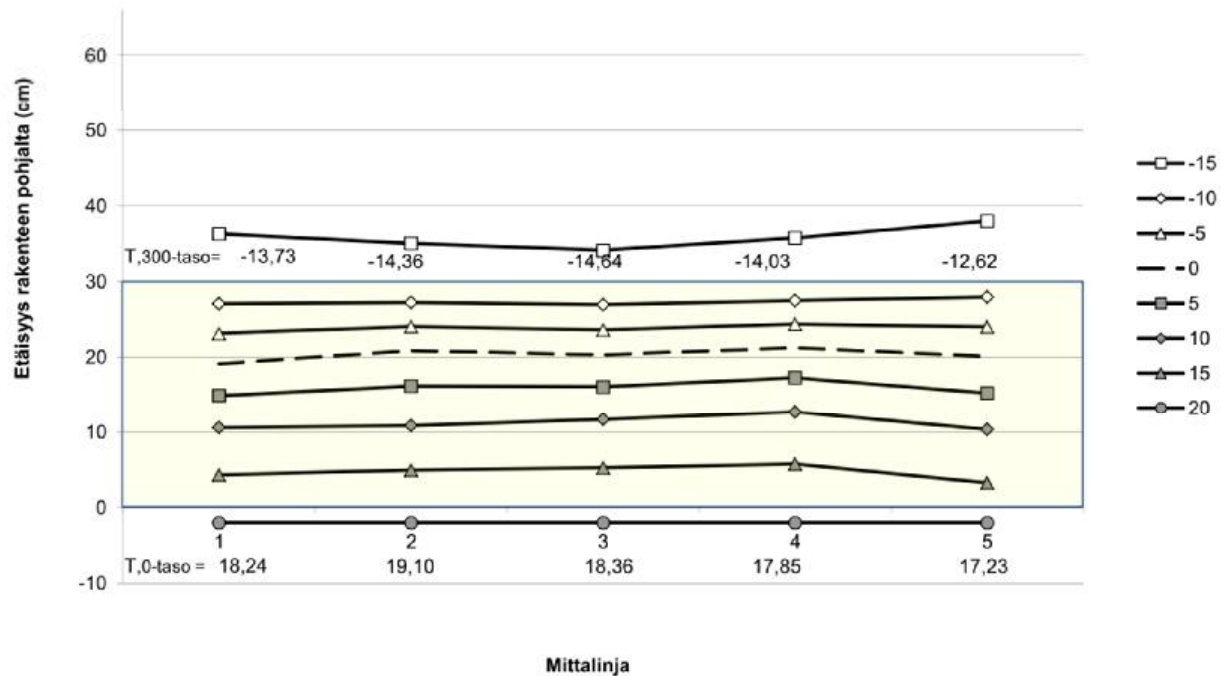
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH300 Lasivillapuhalluseriste 30 cm
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,64\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 12.6.2011 11:57
 $T_i = 19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

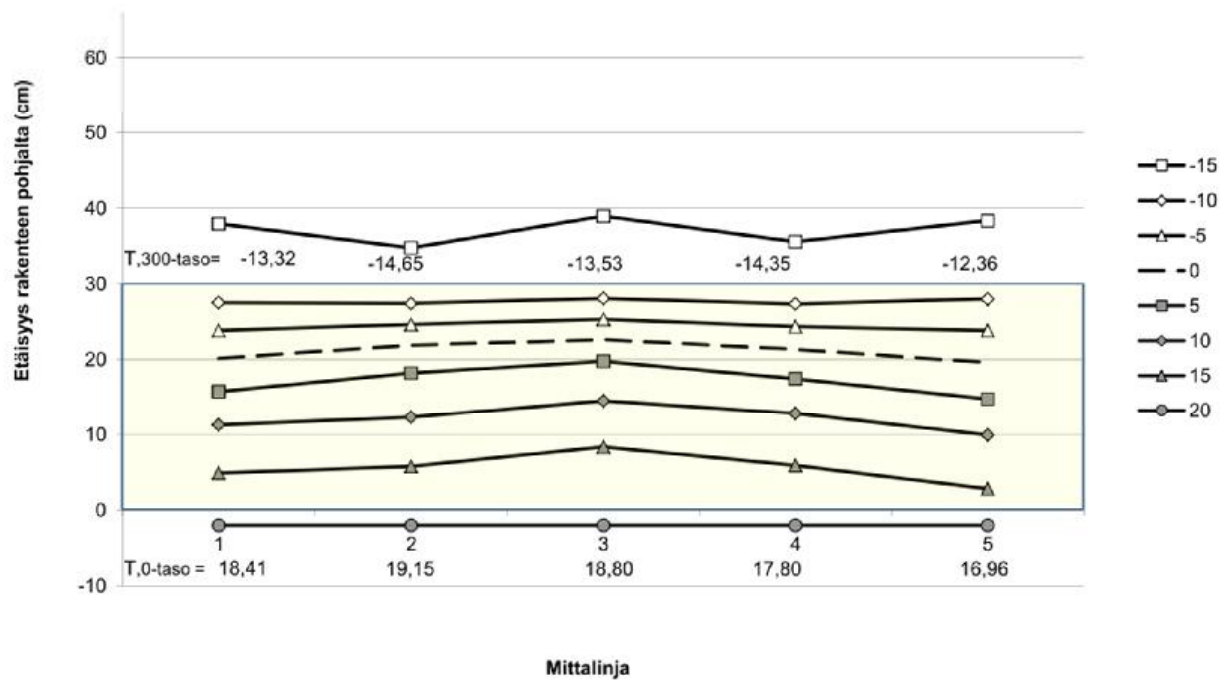
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH300 Lasivillapuhalluseriste 30 cm
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,41\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 12.6.2011 18:59
 $T_i = 19,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



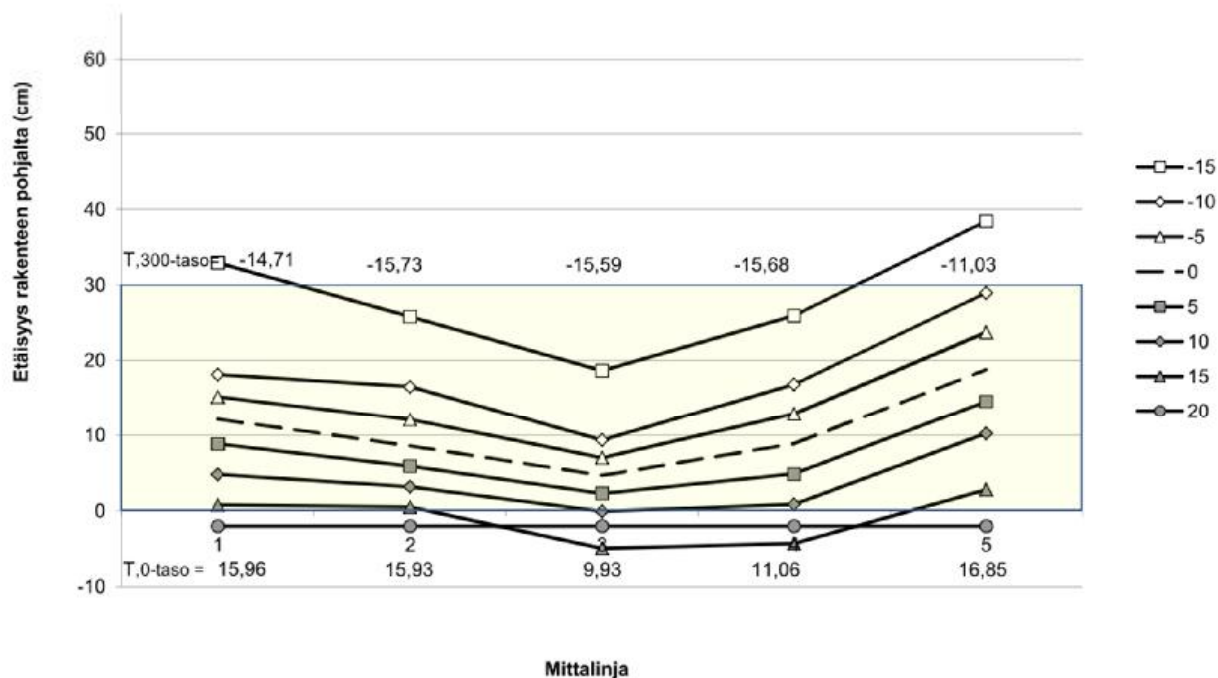
LIITE 1 (10/32)

KOE: PUH300
TILA: PÄÄLLITUUL

Lasivillapuhalluseriste 30 cm
 $T_e = -15,70\text{ °C}$

AIKA: 13.6.2011 1:53
 $T_i = 20,2\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

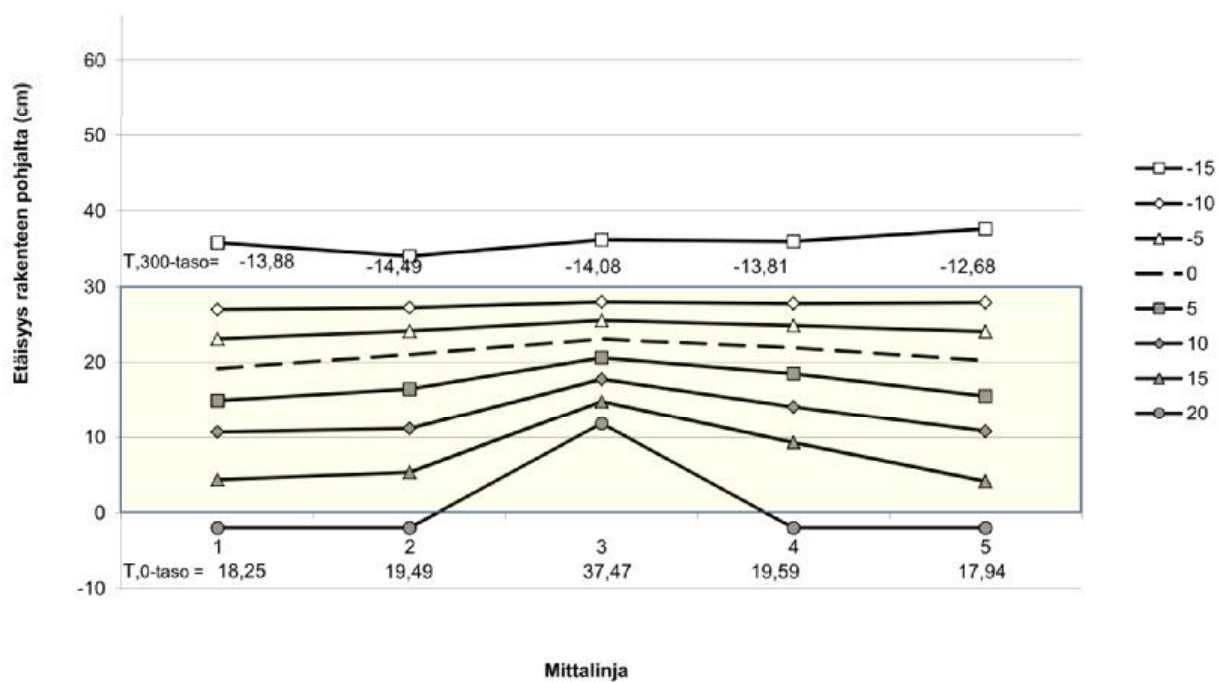


KOE: PUH300
TILA: LAMPPU

Lasivillapuhalluseriste 30 cm
 $T_e = -15,73\text{ °C}$

AIKA: 13.6.2011 10:53
 $T_i = 19,6\text{ °C}$

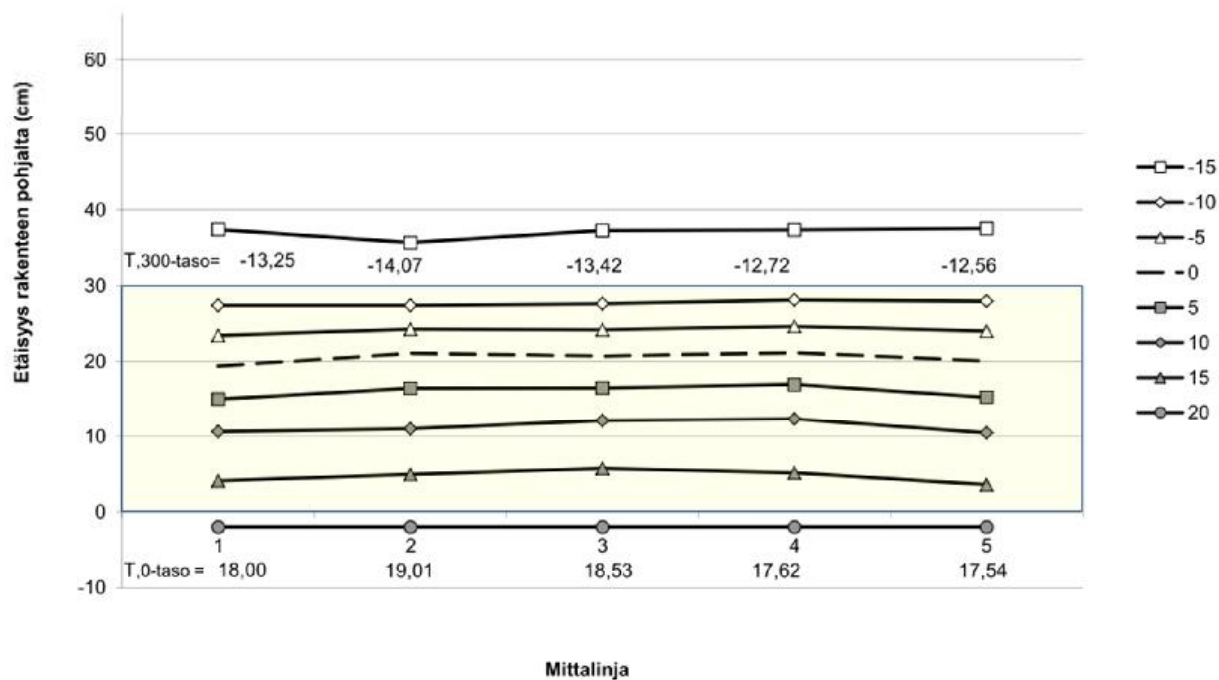
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH300T Lasivillapuhalluseriste 30 cm, pinnassa Tyvek
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,70\text{ °C}$

AIKA: 13.6.2011 19:17
 $T_i = 19,9\text{ °C}$

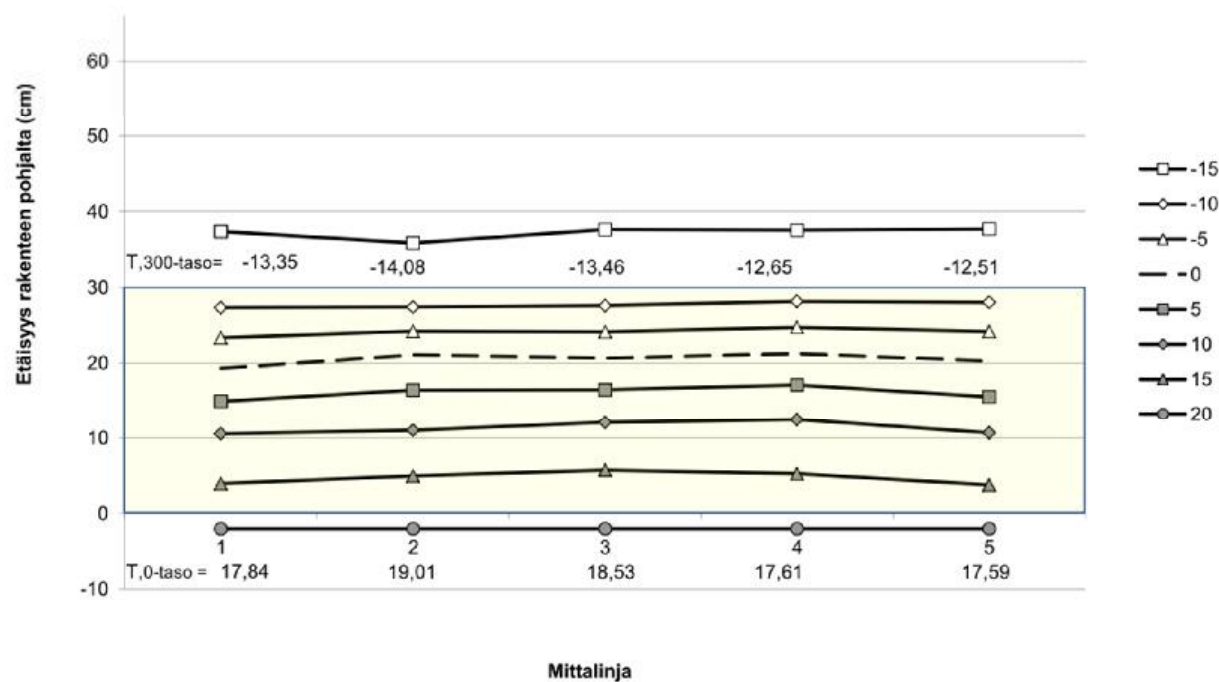
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH300T Lasivillapuhalluseriste 30 cm, pinnassa Tyvek
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,64\text{ °C}$

AIKA: 13.6.2011 21:47
 $T_i = 20,1\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

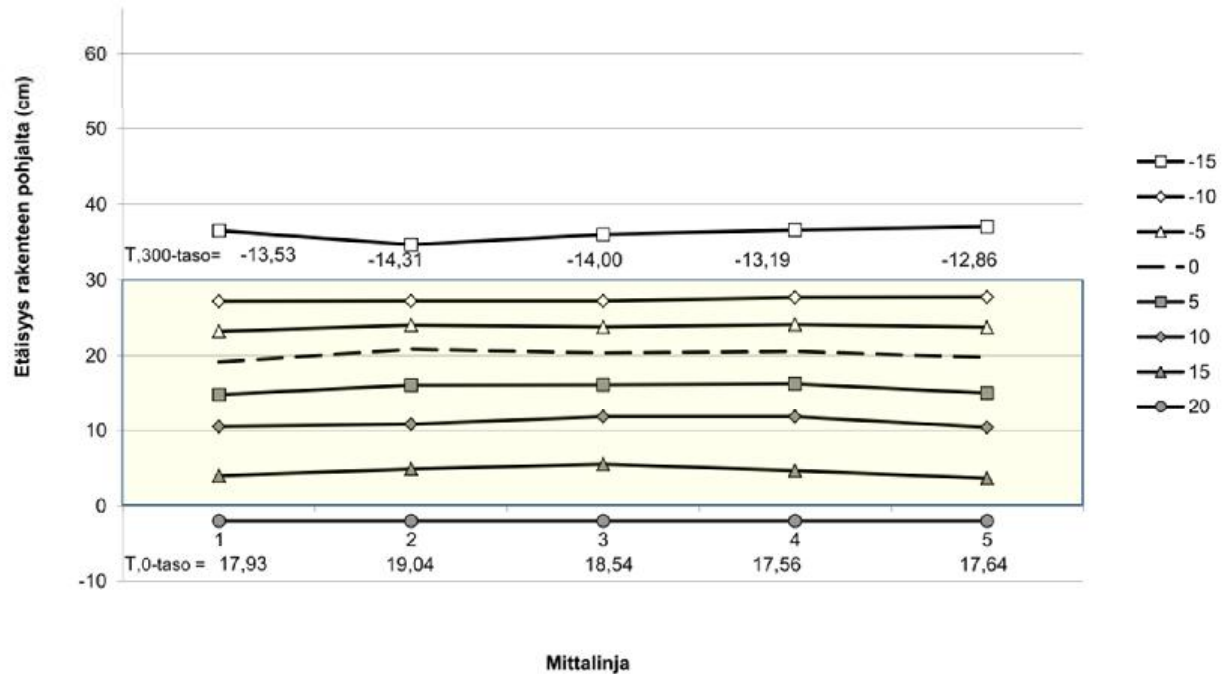


LIITE 1 (12/32)

KOE: PUH300T Lasivillapuhalluseriste 30 cm, pinnassa Tyvek
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,81\text{ °C}$

AIKA: 14.6.2011 4:19
 $T_i = 20,2\text{ °C}$

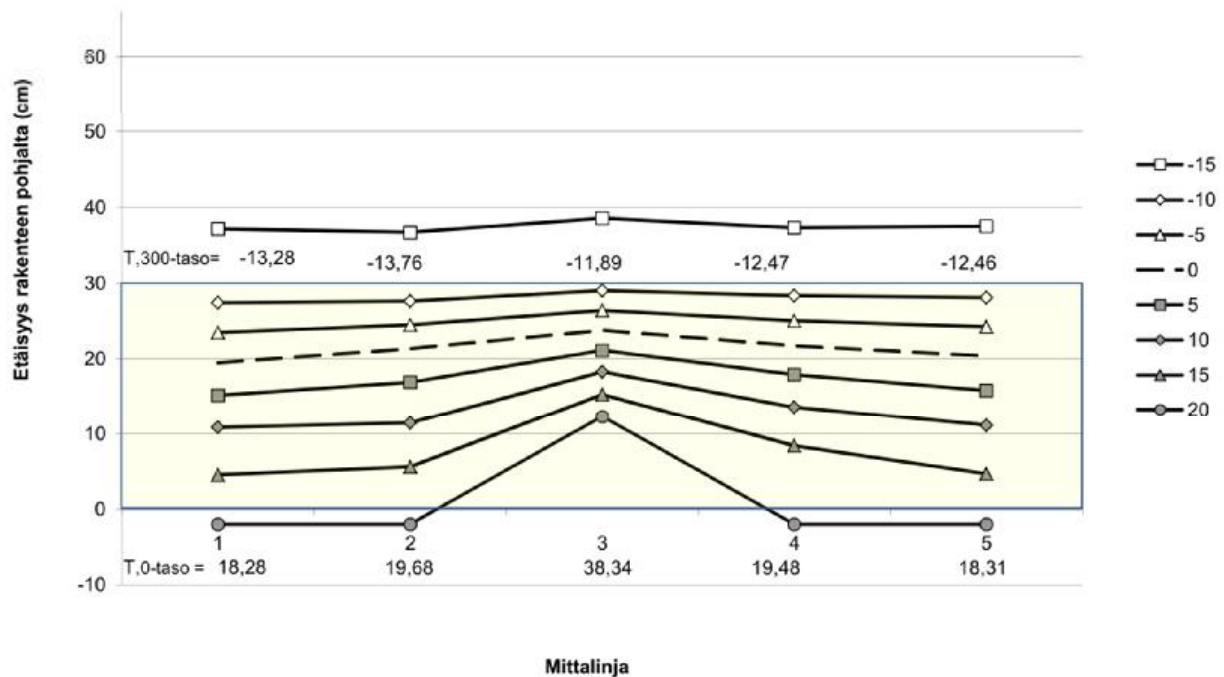
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH300T Lasivillapuhalluseriste 30 cm, pinnassa Tyvek
TILA: LAMPPU $T_e = -15,72\text{ °C}$

AIKA: 14.6.2011 12:13
 $T_i = 20,2\text{ °C}$

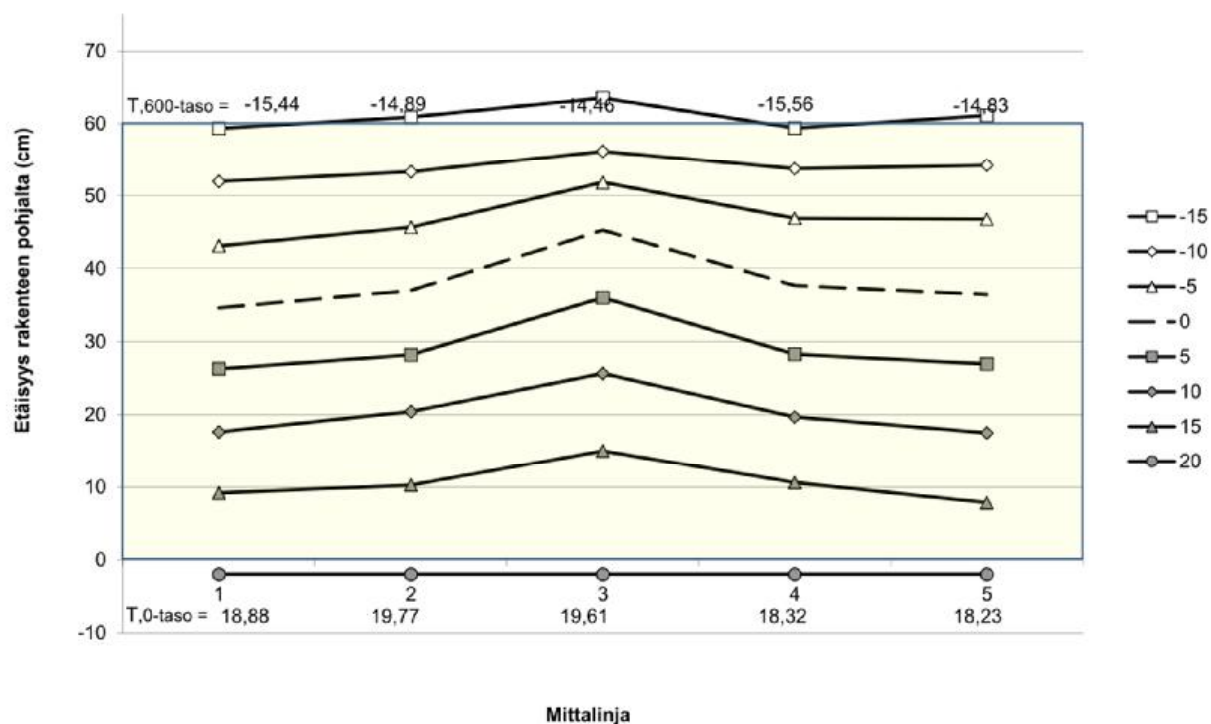
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH600 Lasivillapuhalluseriste 60 cm
TILA: STABIILITILA $T_{e} = -16,16\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 19.6.2011 12:44
 $T_{i} = 19,9\text{ }^{\circ}\text{C}$

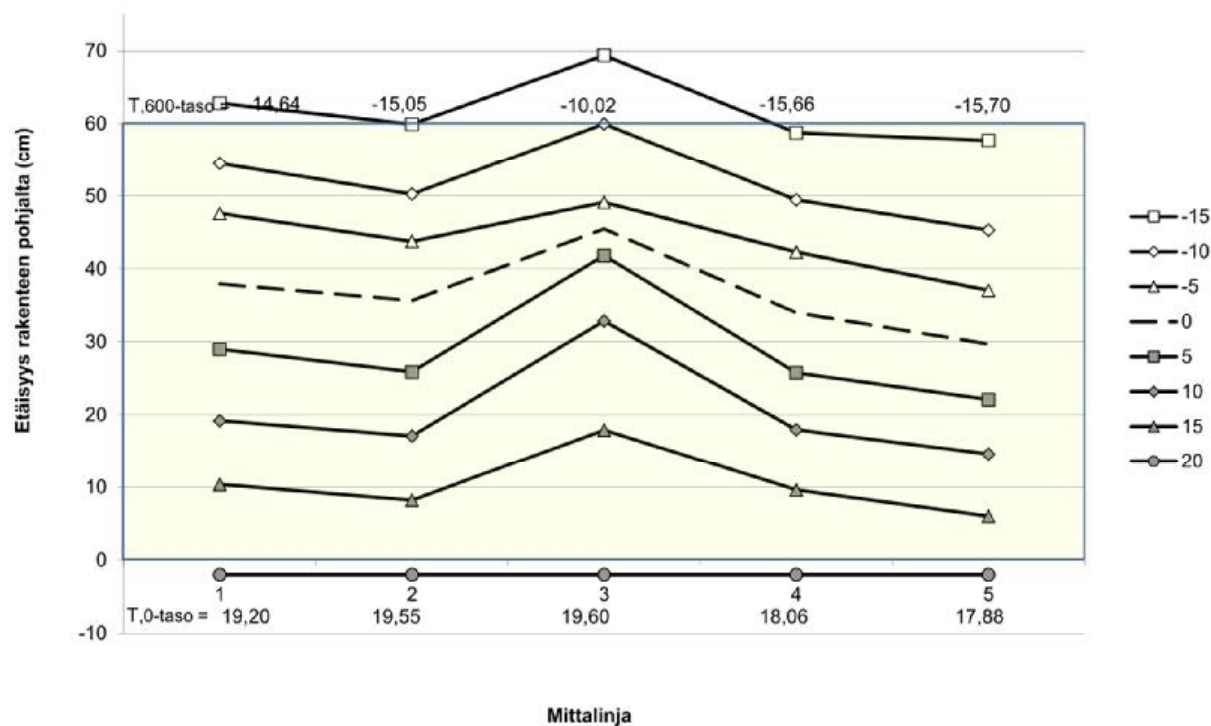
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH600 Lasivillapuhalluseriste 60 cm
TILA: SIVUTUUL $T_{e} = -15,73\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 19.6.2011 20:36
 $T_{i} = 19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



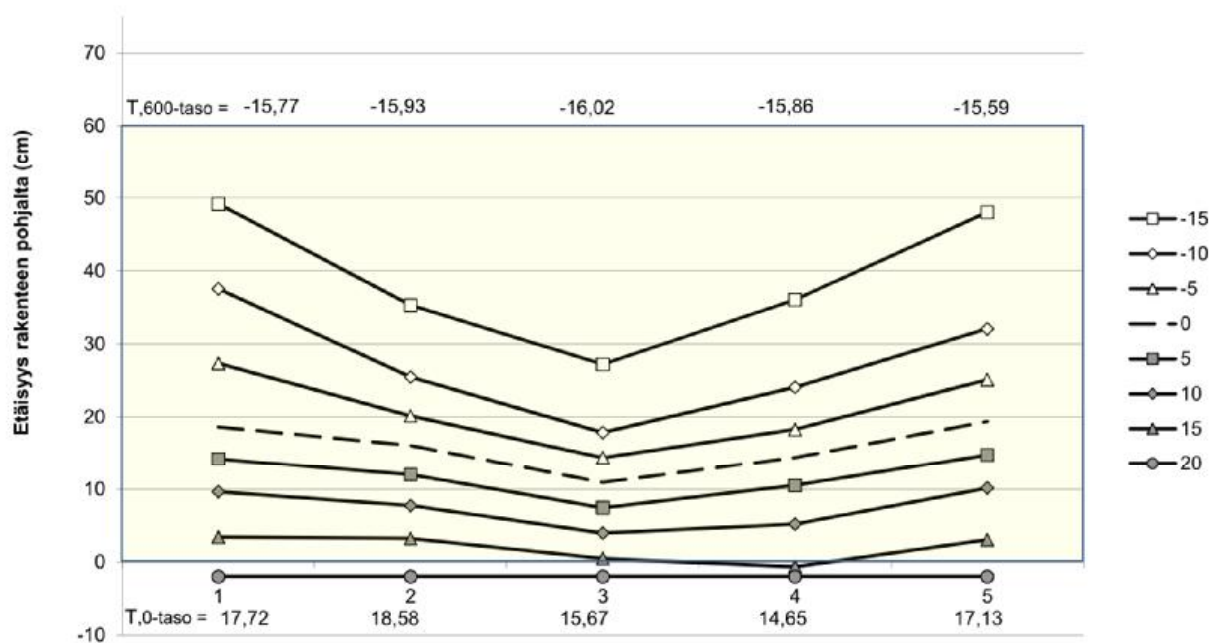
LIITE 1 (14/32)

KOE: PUH600
TILA: PÄÄLLITUUL

Lasivillapuhalluseriste 60 cm
 $T_{e} = -15,99 \text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 20.6.2011 6:42
 $T_{i} = 20,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

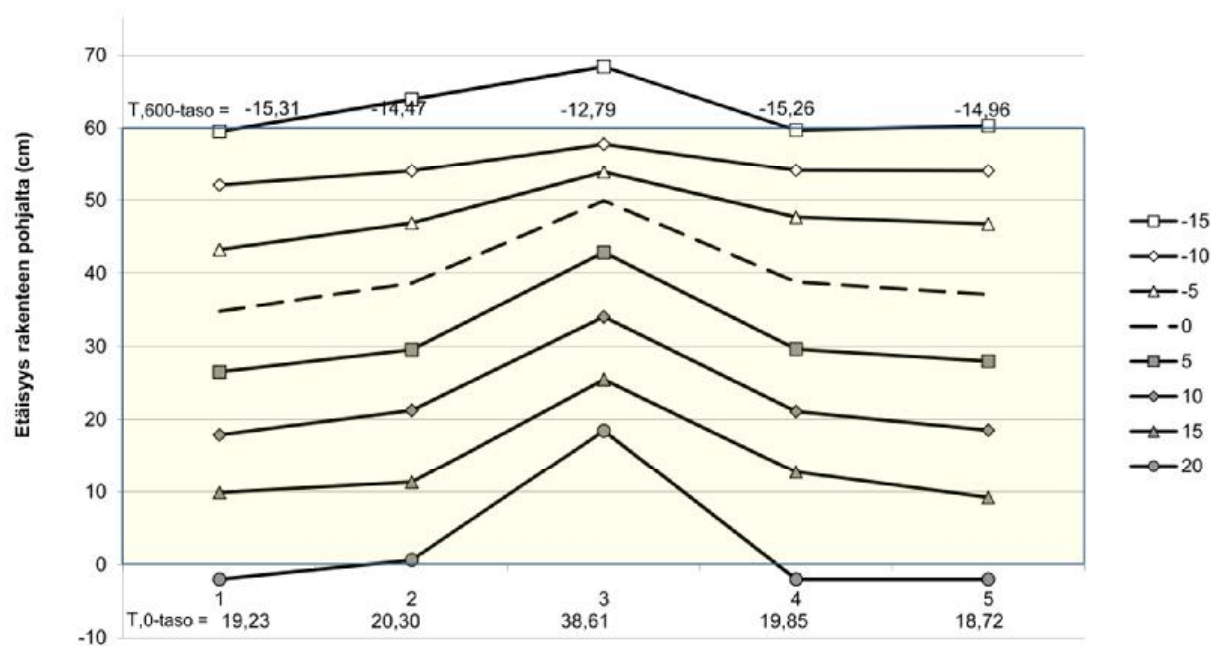


KOE: PUH600
TILA: LAMPPU

Lasivillapuhalluseriste 60 cm
 $T_{e} = -15,82 \text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 21.6.2011 6:40
 $T_{i} = 20,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

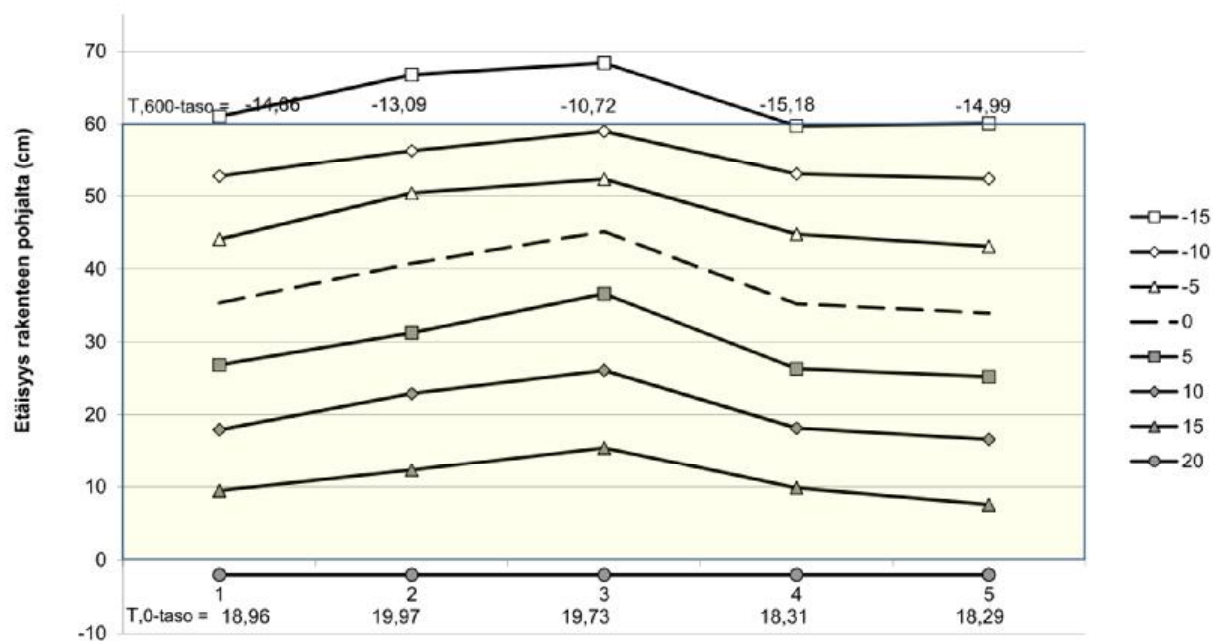
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH600T Lasivillapuhalluseriste 60 cm Tyvek pinnassa
 TILA: STABIILITILA $T_e = -16,05\text{ °C}$

AIKA: 21.6.2011 19:56
 $T_i = 19,4\text{ °C}$

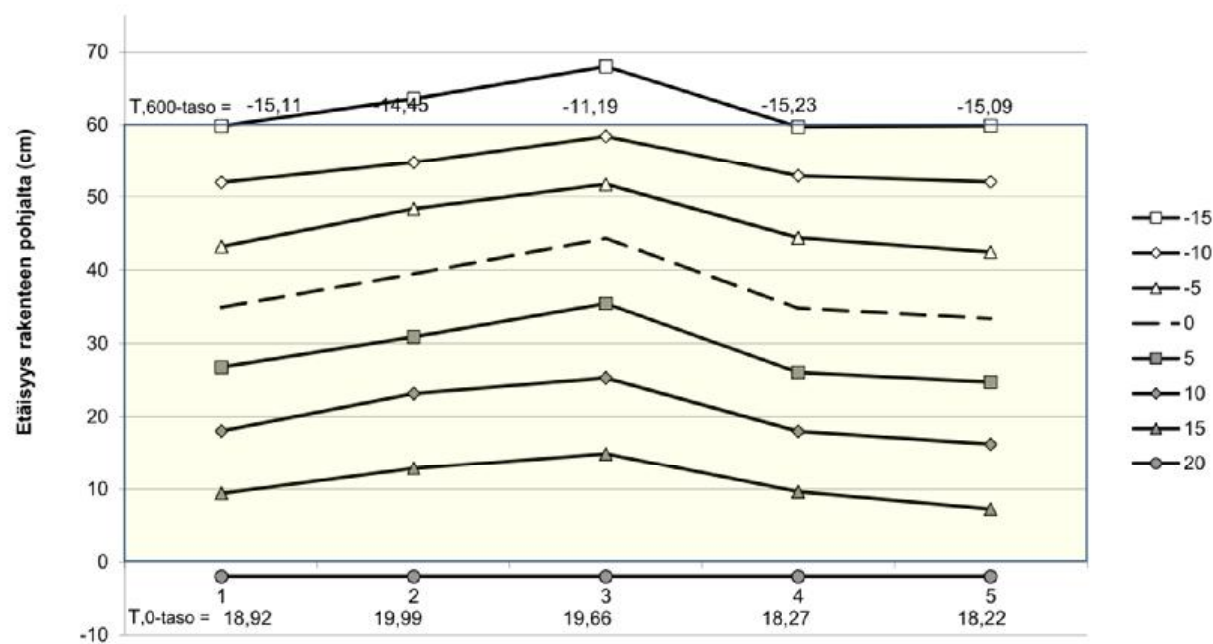
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUH600T Lasivillapuhalluseriste 60 cm Tyvek pinnassa
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -16,11\text{ °C}$

AIKA: 22.6.2011 1:14
 $T_i = 19,6\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



Mittalinja

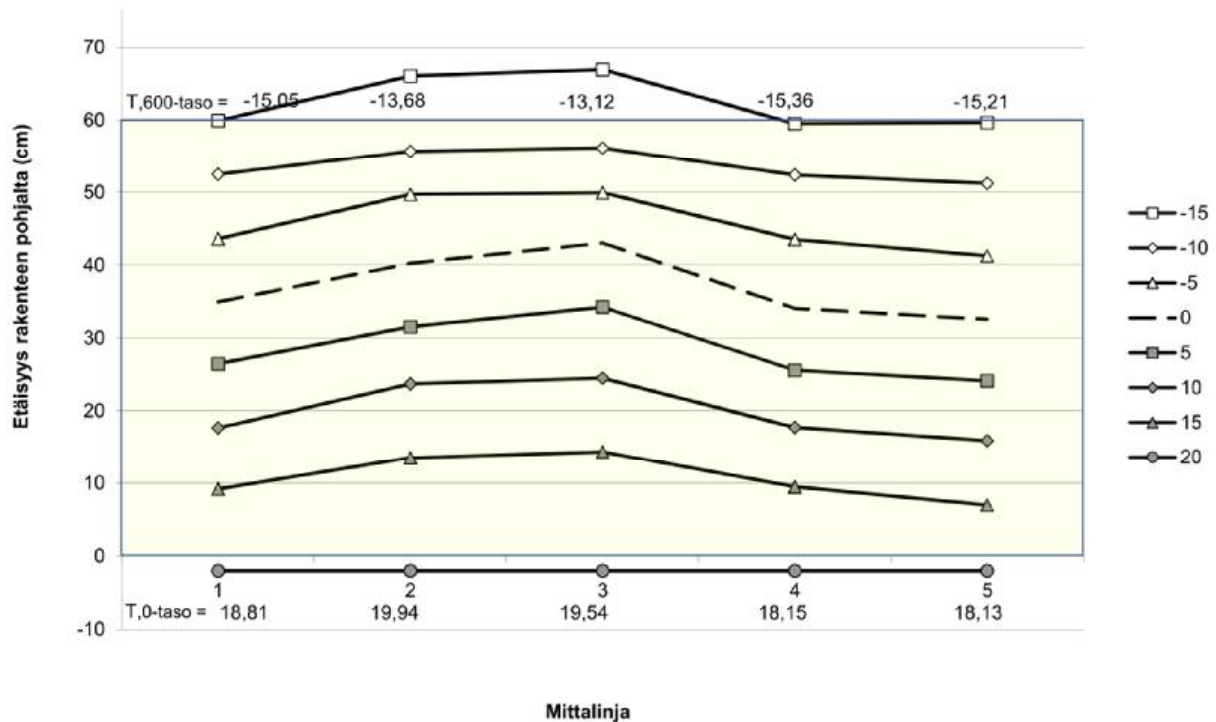
LIITE 1 (16/32)

KOE: PUH600T
TILA: PÄÄLLITUUL

Lasivillapuhalluseriste 60 cm Tyvek pinnassa
 $T_{e} = -15,93\text{ °C}$

AIKA: 22.6.2011 8:19
 $T_{i} = 20,0\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

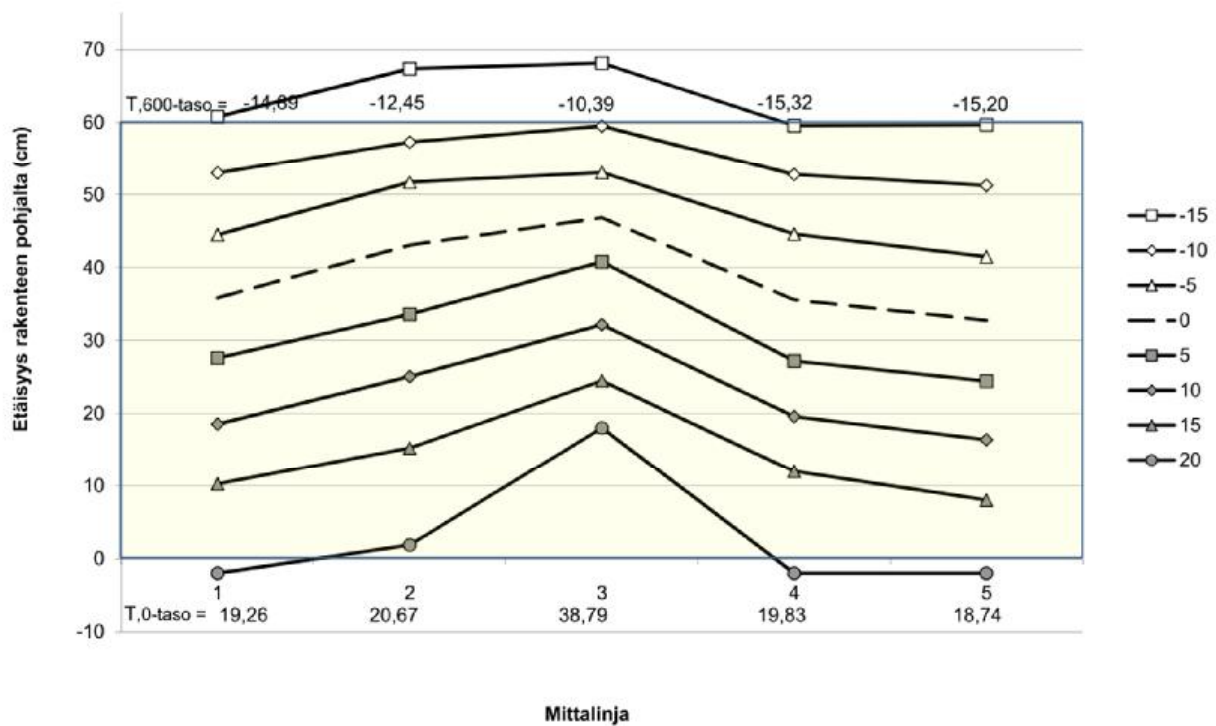


KOE: PUH600T
TILA: LAMPPU

Lasivillapuhalluseriste 60 cm Tyvek pinnassa
 $T_{e} = -16,20\text{ °C}$

AIKA: 22.6.2011 20:05
 $T_{i} = 20,3\text{ °C}$

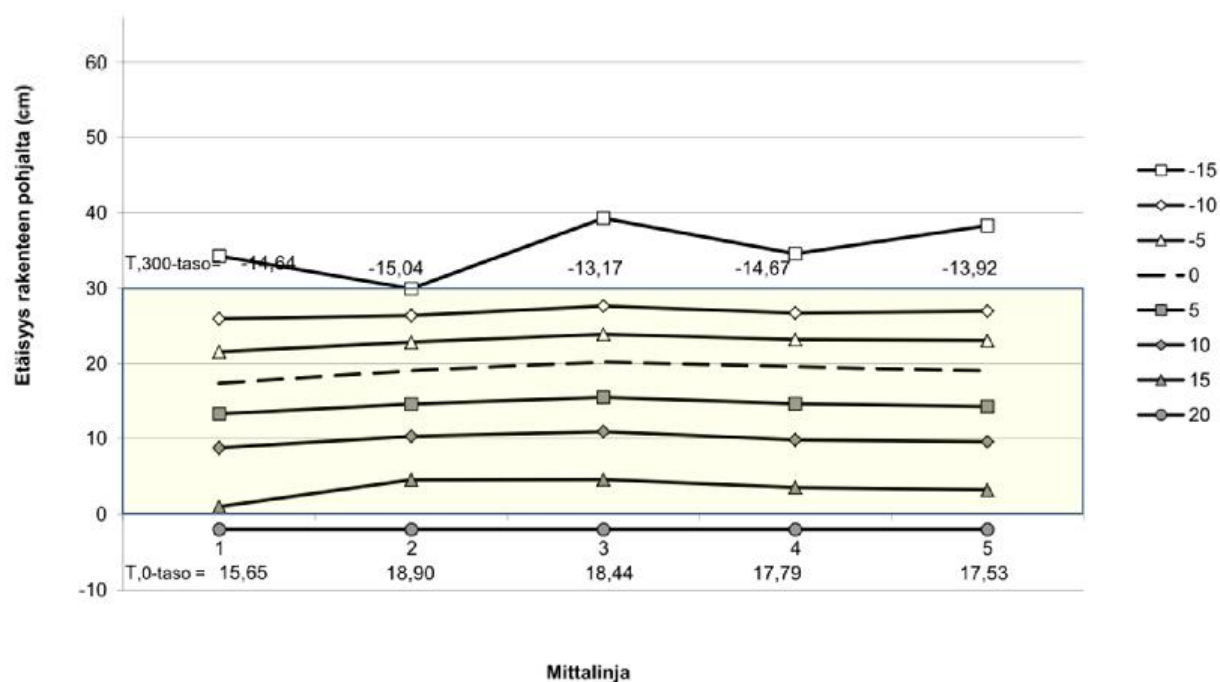
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU300 Puukuitueriste 30cm
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,32\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 9.7.2011 1:47
 $T_i = 19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

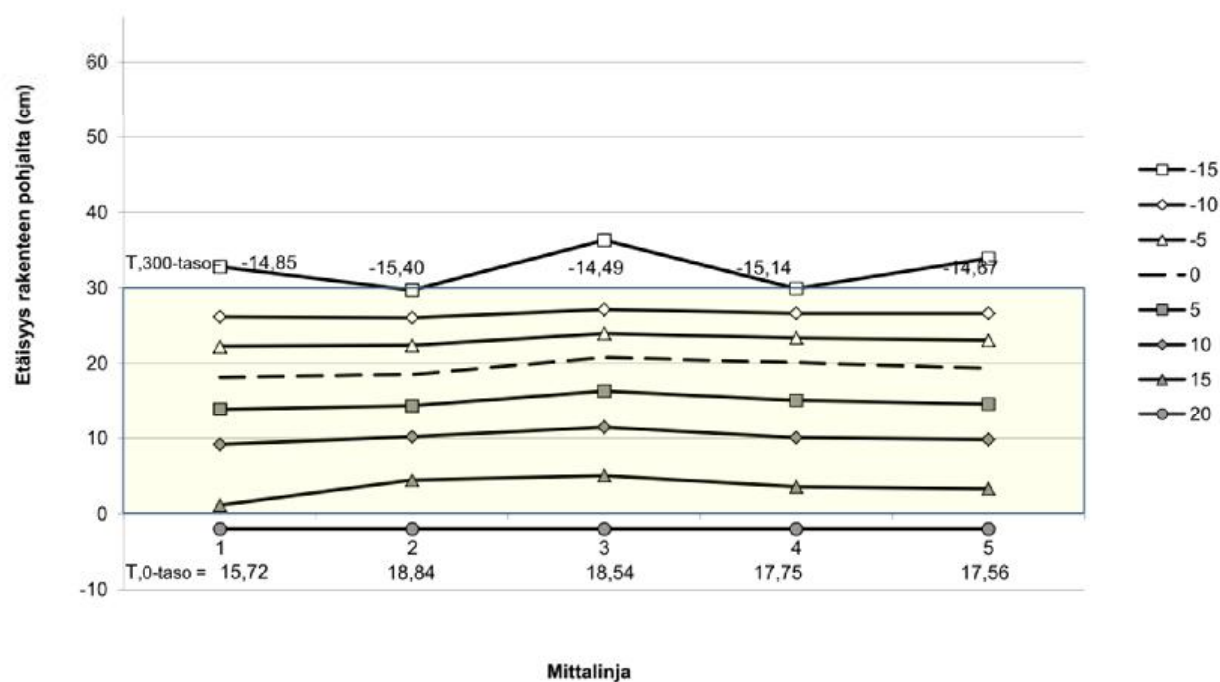
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU300 Puukuitueriste 30cm
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,44\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 9.7.2011 7:10
 $T_i = 20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

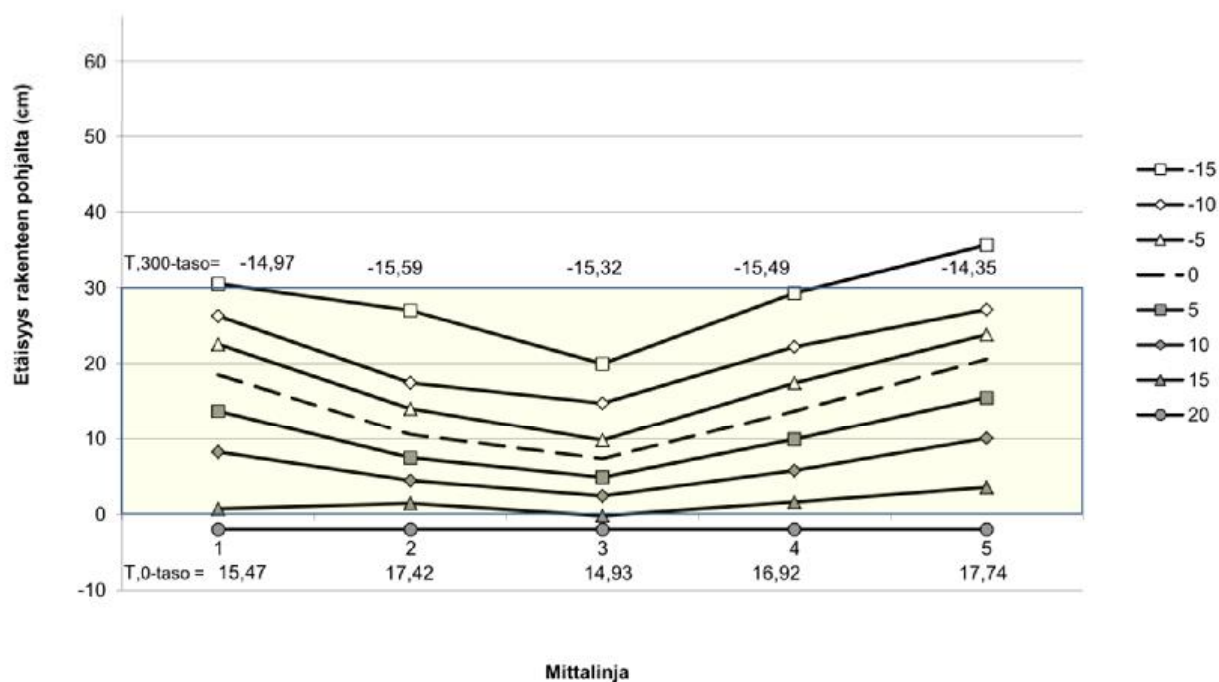


KOE: PUU300
TILA: PÄÄLLITUUL

Puukuitueriste 30cm
 $T_e = -15,47\text{ °C}$

AIKA: 9.7.2011 18:42
 $T_i = 19,7\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

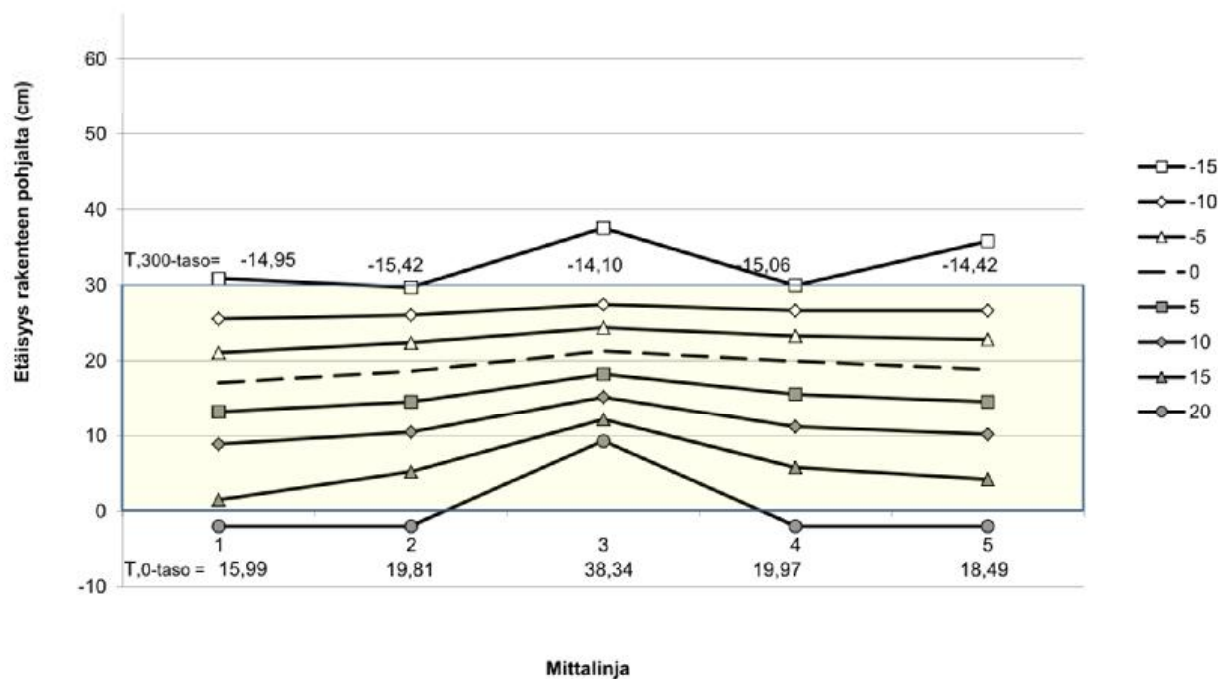


KOE: PUU300
TILA: LAMPPU

Puukuitueriste 30cm
 $T_e = -15,46\text{ °C}$

AIKA: 10.7.2011 6:05
 $T_i = 19,6\text{ °C}$

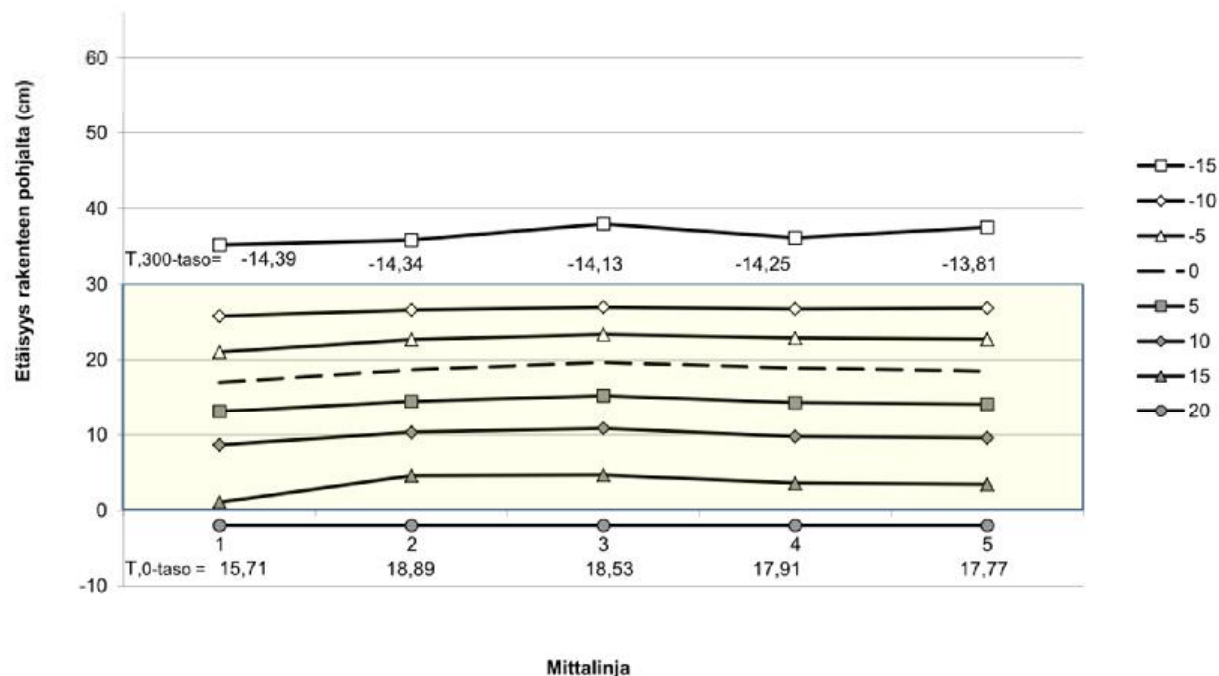
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU300T Puukuitueriste 30cm, pinnassa tyvek
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,43\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 13.7.2011 6:06
 $T_j = 20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

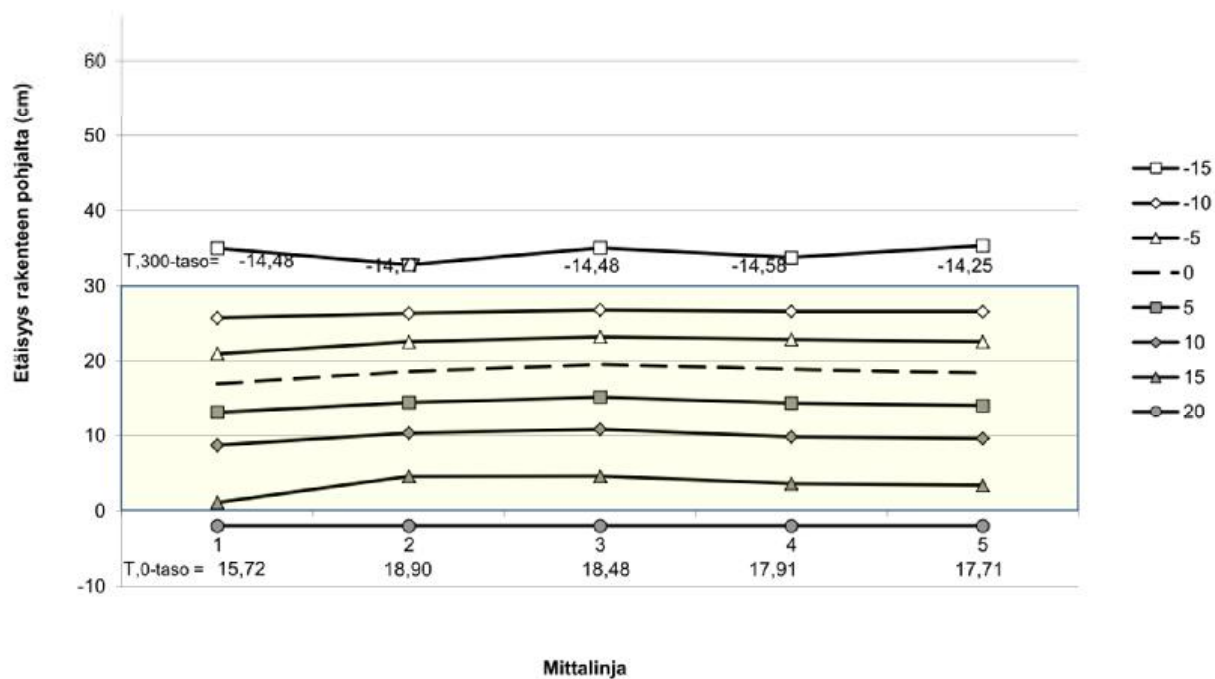
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU300T Puukuitueriste 30cm, pinnassa tyvek
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,60\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 13.7.2011 12:17
 $T_j = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

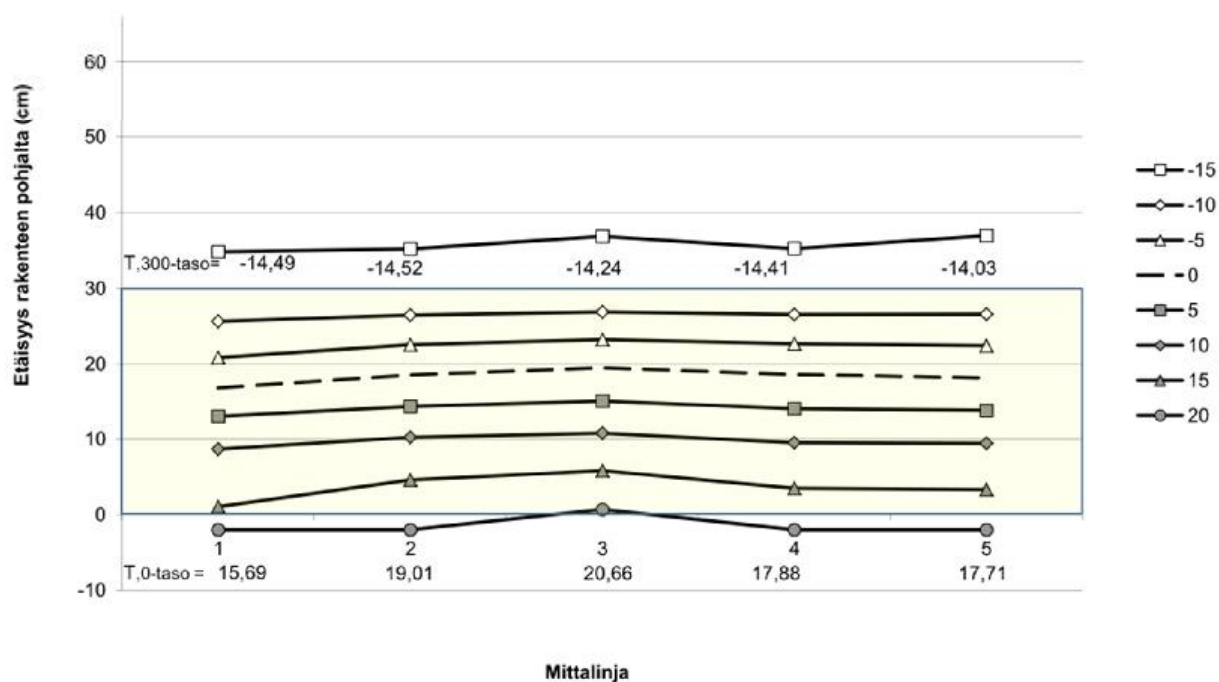
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU300T Puukuitueriste 30cm, pinnassa tyvek
 TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,46\text{ °C}$

AIKA: 13.7.2011 20:25
 $T_i = 20,3\text{ °C}$

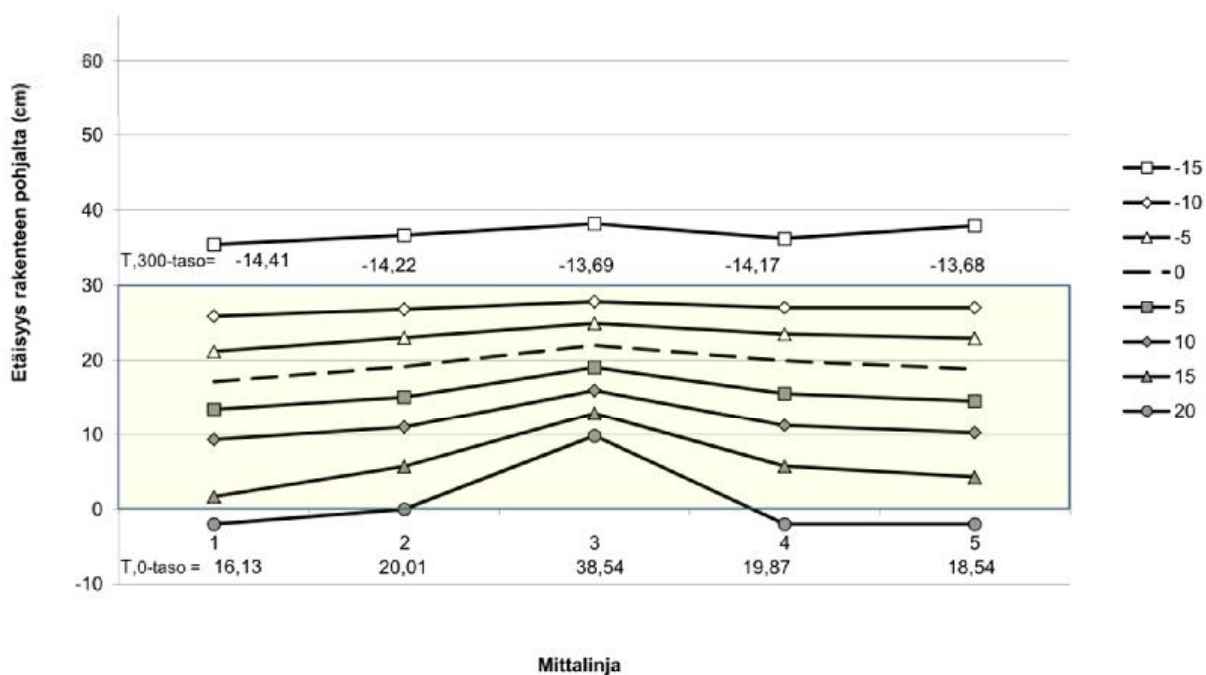
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU300T Puukuitueriste 30cm, pinnassa tyvek
 TILA: LAMPPU $T_e = -15,41\text{ °C}$

AIKA: 14.7.2011 7:03
 $T_i = 20,4\text{ °C}$

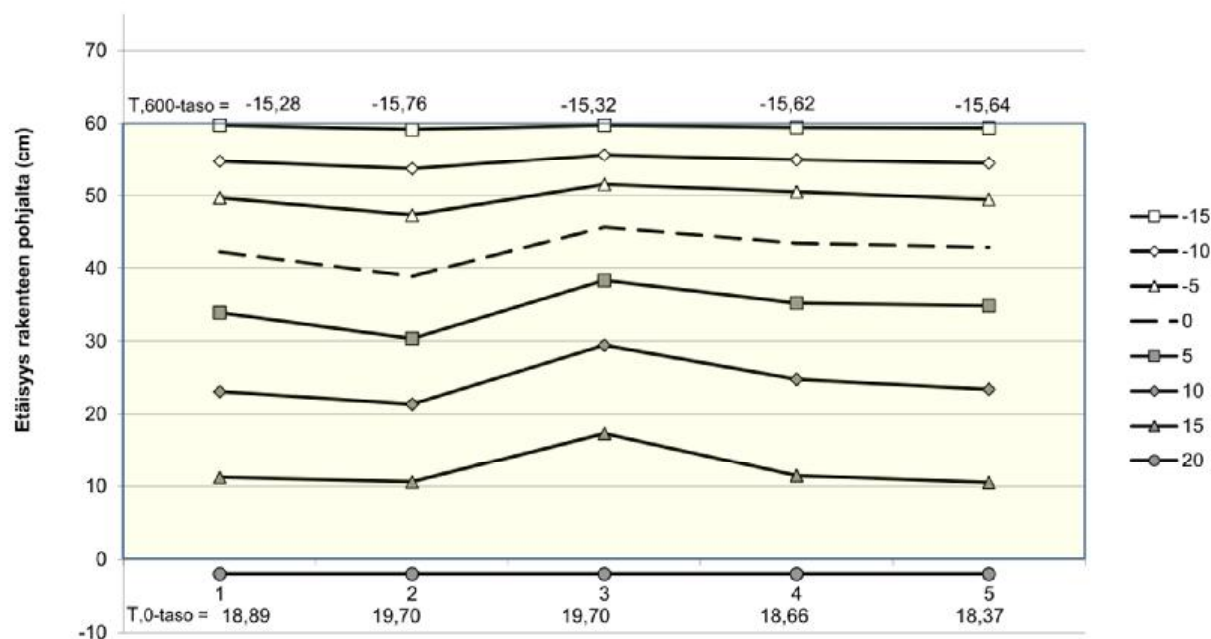
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU600 Puukuitueriste 60cm
TILA: STABIILITILA $T_e = -15,93\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 8.6.2011 22:48
 $T_i = 19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

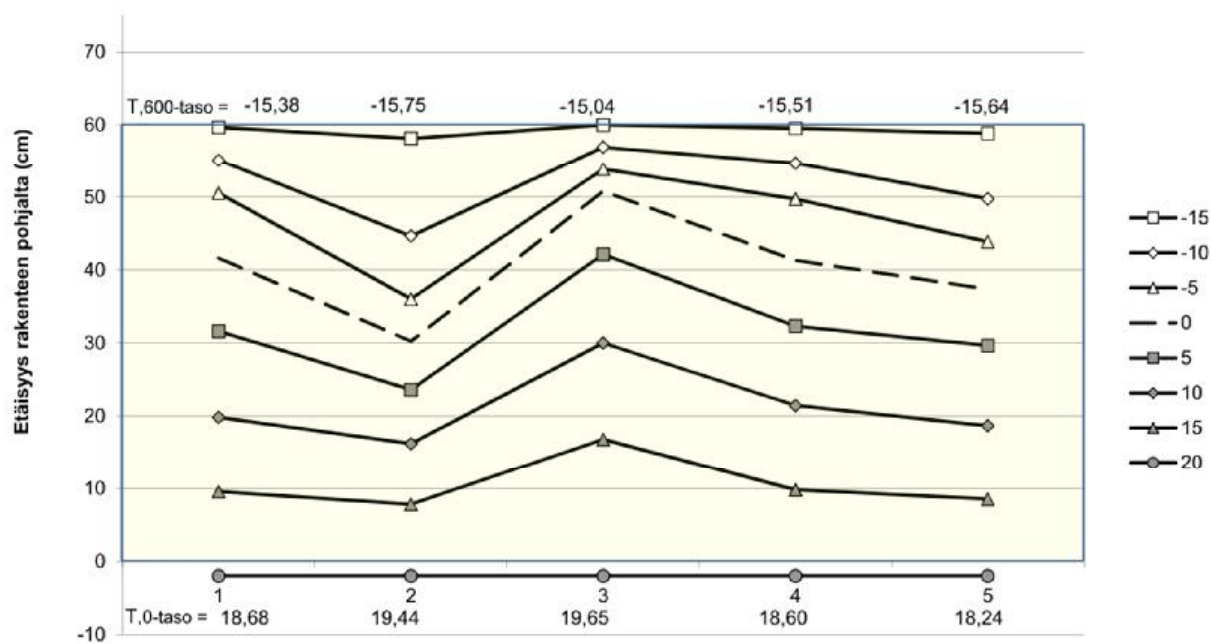
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU600 Puukuitueriste 60cm
TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,75\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 9.6.2011 7:29
 $T_i = 20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



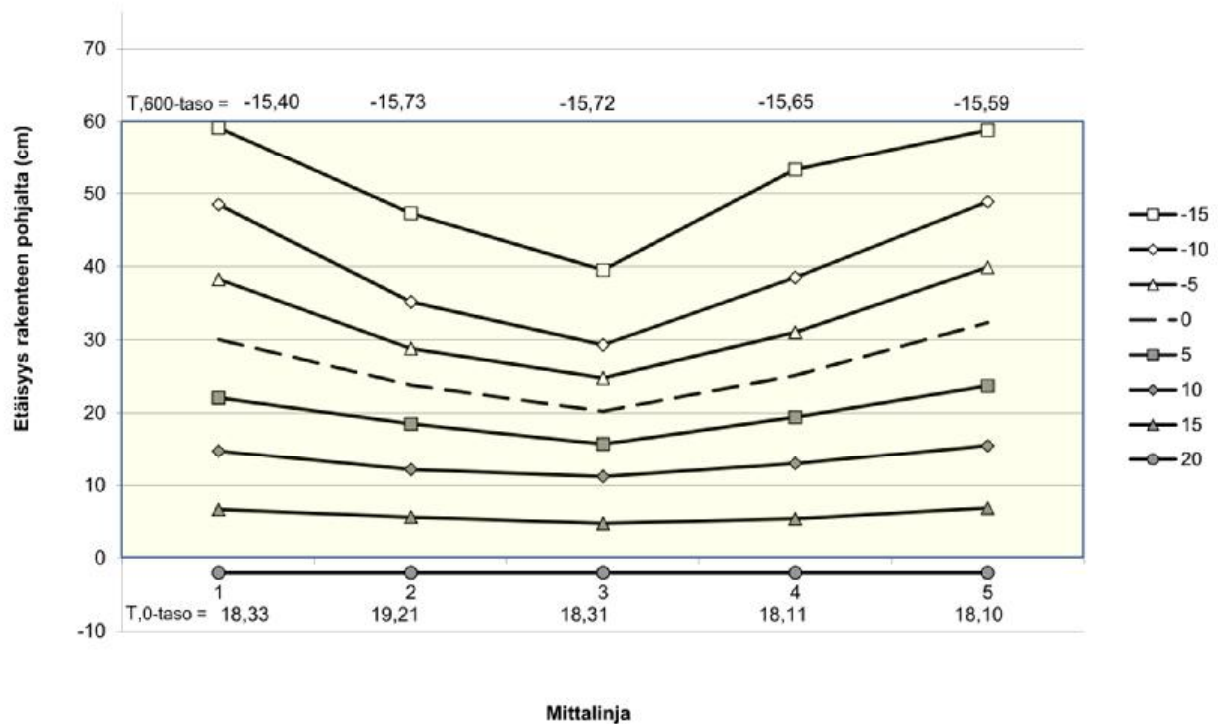
LIITE 1 (22/32)

KOE: PUU600
TILA: PÄÄLLITUUL

Puukuitueriste 60cm
 $T_{e} = -15,78 \text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 9.6.2011 23:01
 $T_{i} = 19,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

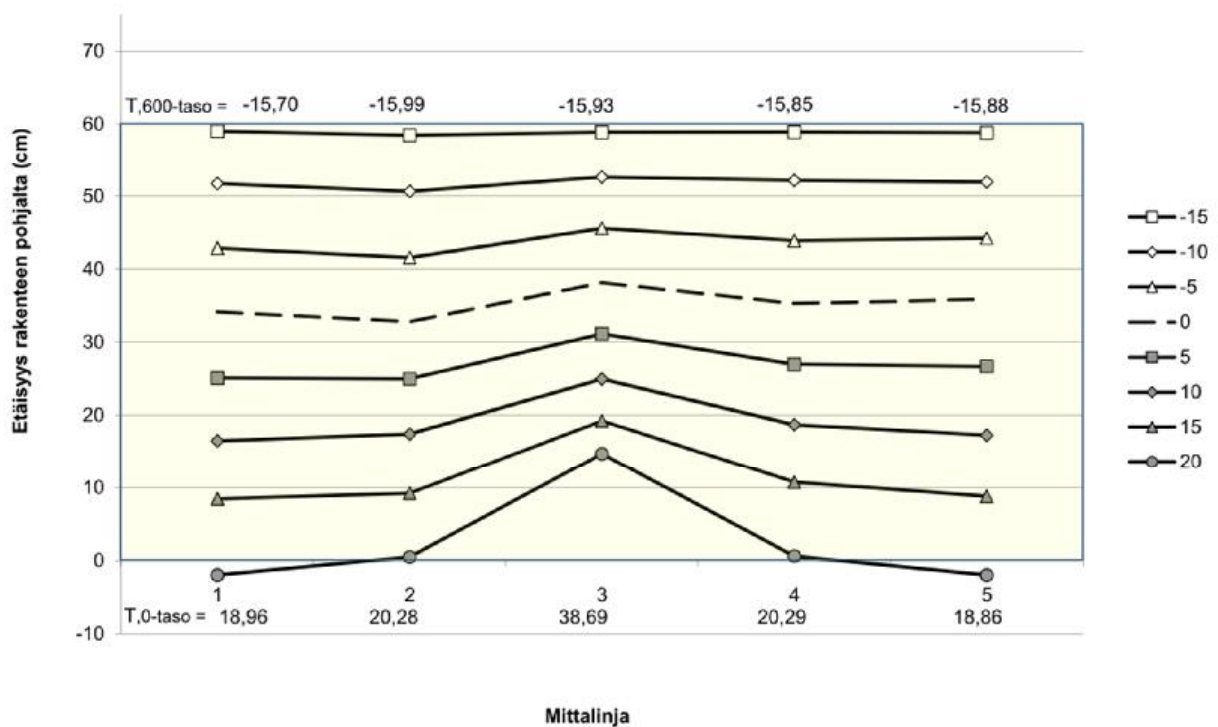


KOE: PUU600
TILA: LAMPPU

Puukuitueriste 60cm
 $T_{e} = -16,06 \text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 10.6.2011 15:43
 $T_{i} = 19,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

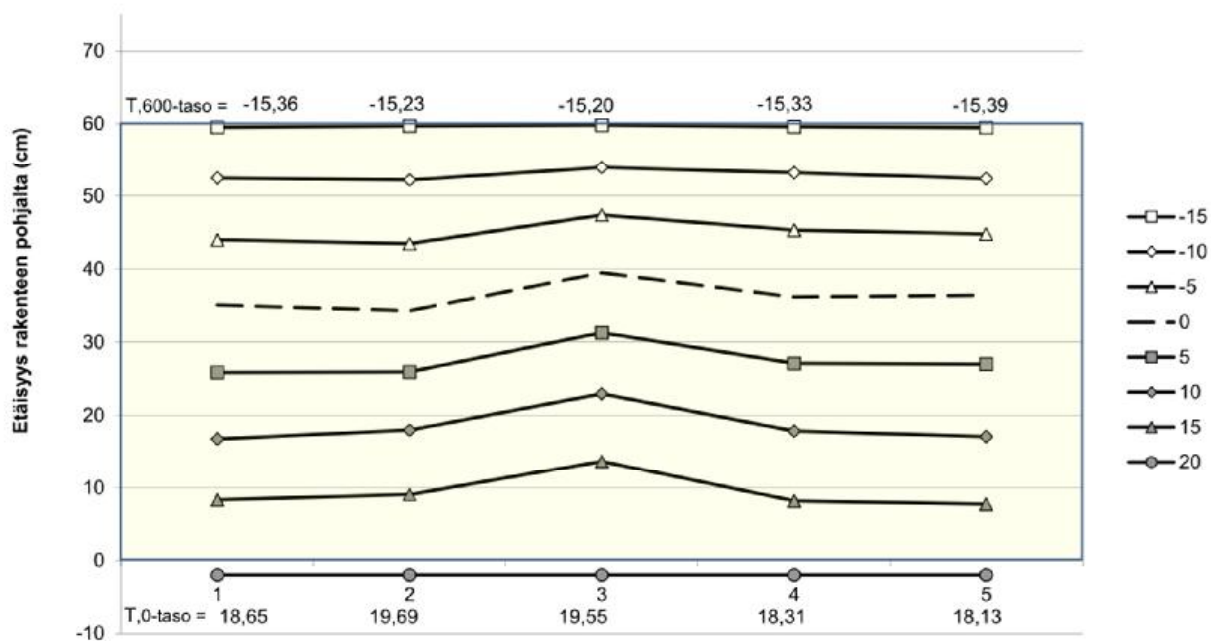
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU600T Puukuitueriste 60cm, pinnassa tyvek
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,91\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 10.6.2011 23:52
 $T_i = 20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

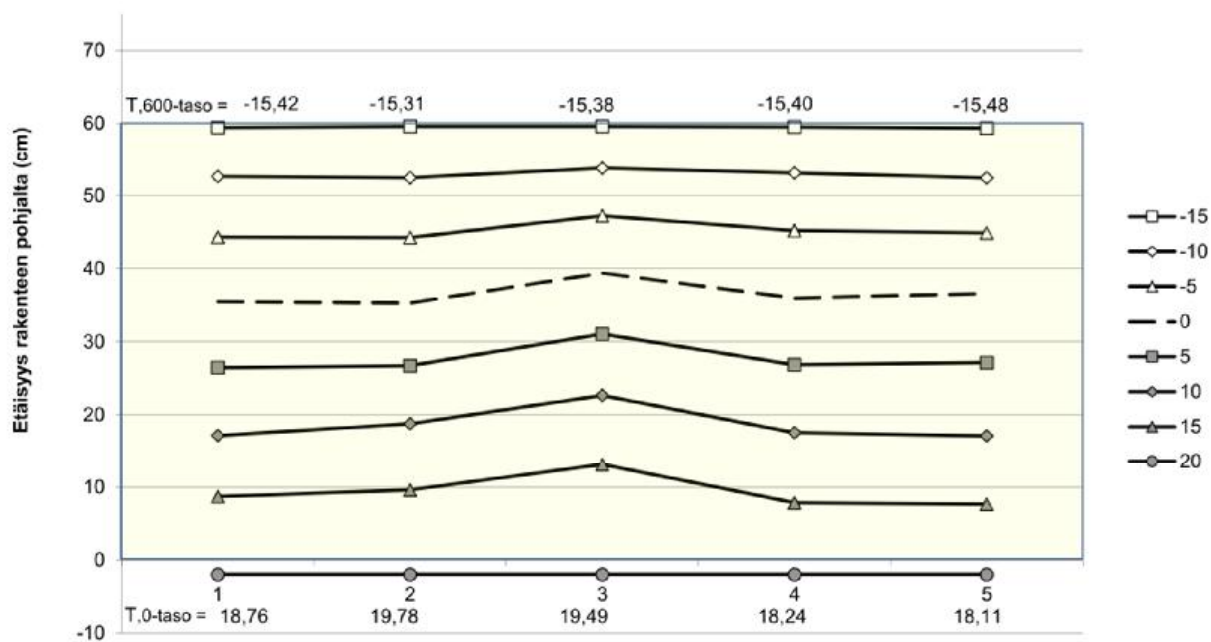


Mittalinja

KOE: PUU600T Puukuitueriste 60cm, pinnassa tyvek
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,88\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 11.6.2011 7:42
 $T_i = 20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

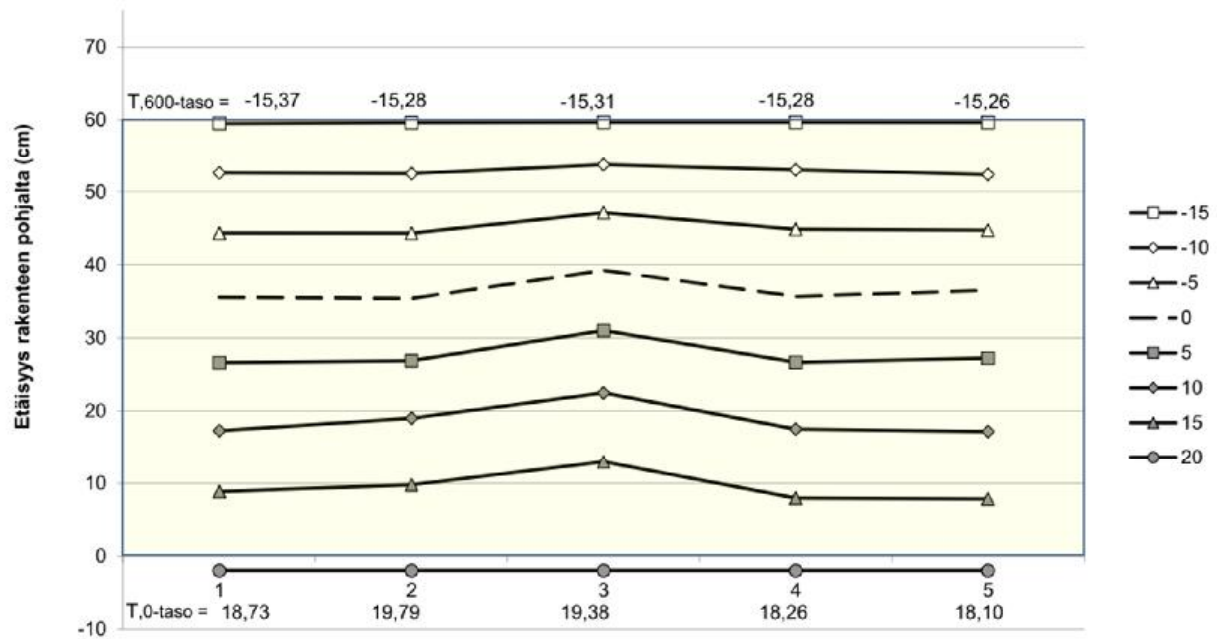


Mittalinja

KOE: PUU600T Puukuitueriste 60cm, pinnassa tyvek
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,75\text{ °C}$

AIKA: 11.6.2011 13:19
 $T_i = 20,5\text{ °C}$

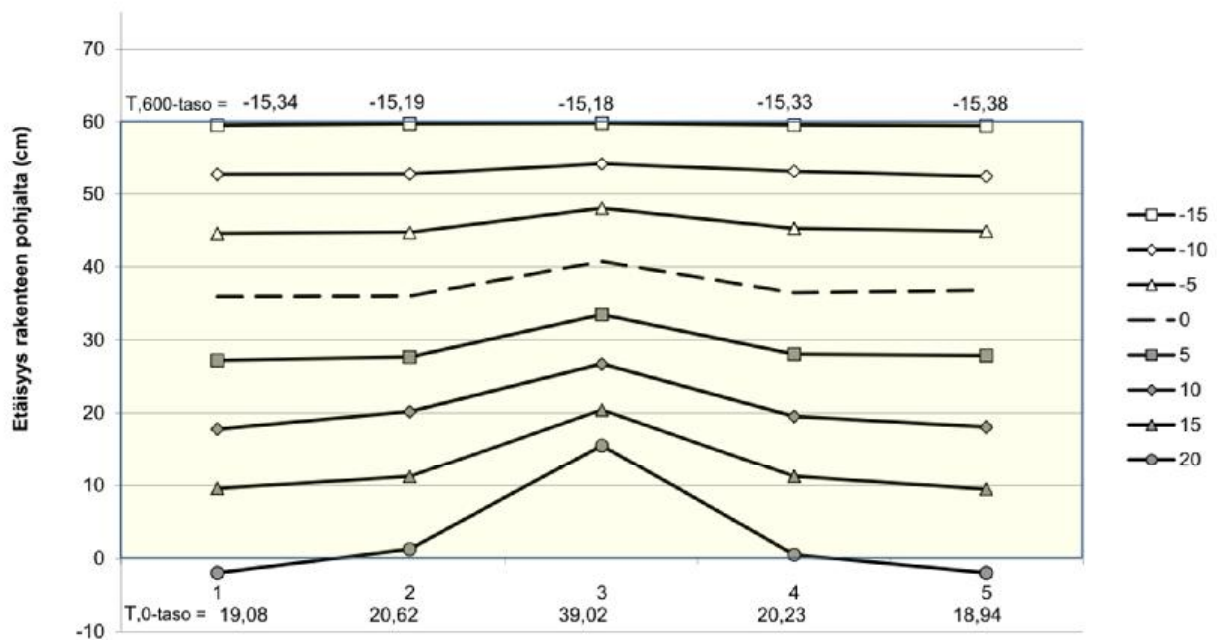
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: PUU600T Puukuitueriste 60cm, pinnassa tyvek
TILA: LAMPPU $T_e = -15,87\text{ °C}$

AIKA: 11.6.2011 22:50
 $T_i = 19,7\text{ °C}$

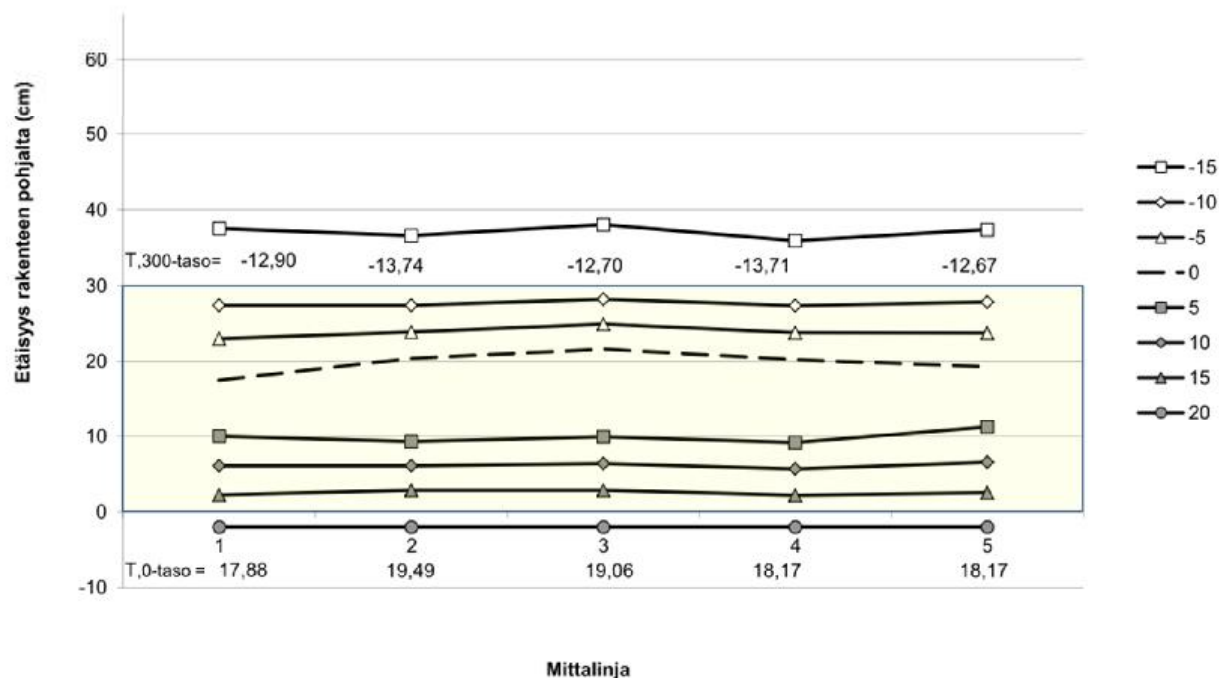
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300 Lasilevyillä 10cm ja -puhallusvilla 20cm
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,71\text{ °C}$

AIKA: 2.7.2011 4:58
 $T_i = 20,4\text{ °C}$

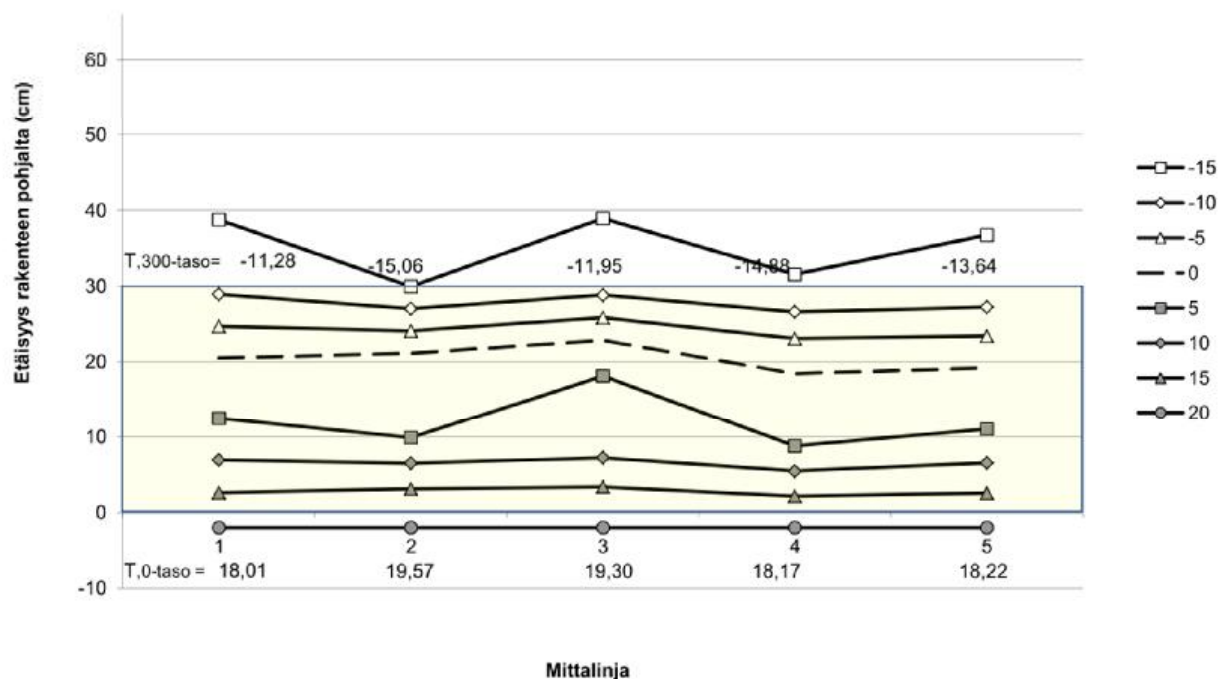
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300 Lasilevyillä 10cm ja -puhallusvilla 20cm
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,55\text{ °C}$

AIKA: 2.7.2011 12:42
 $T_i = 20,3\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät

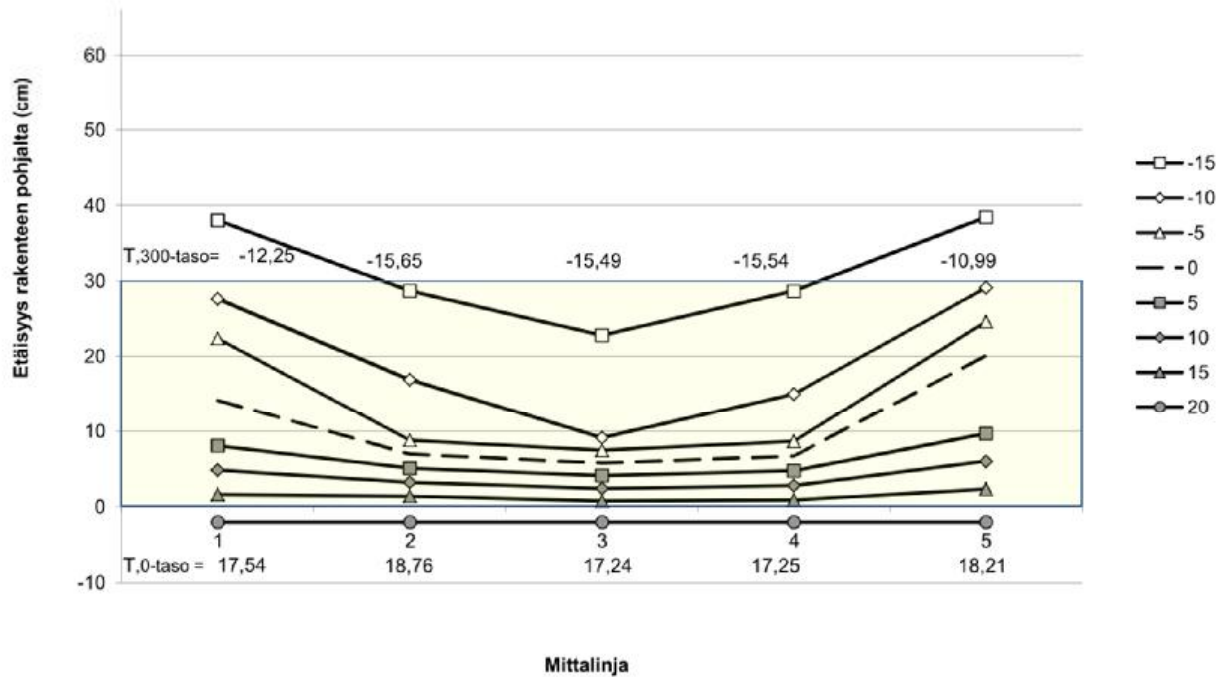


LIITE 1 (26/32)

KOE: LEVYPUH300 Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 20cm
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,67\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 2.7.2011 19:28
 $T_i = 19,9\text{ }^{\circ}\text{C}$

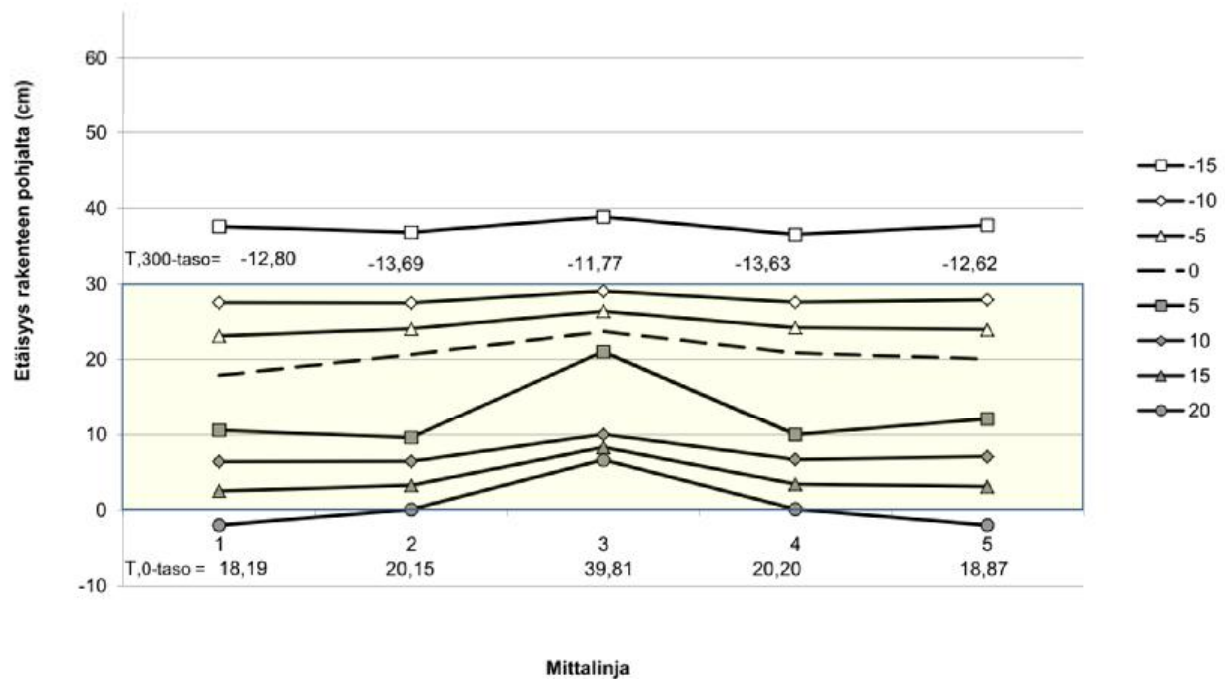
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300 Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 20cm
TILA: LAMPPU $T_e = -15,62\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 3.7.2011 8:21
 $T_i = 19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

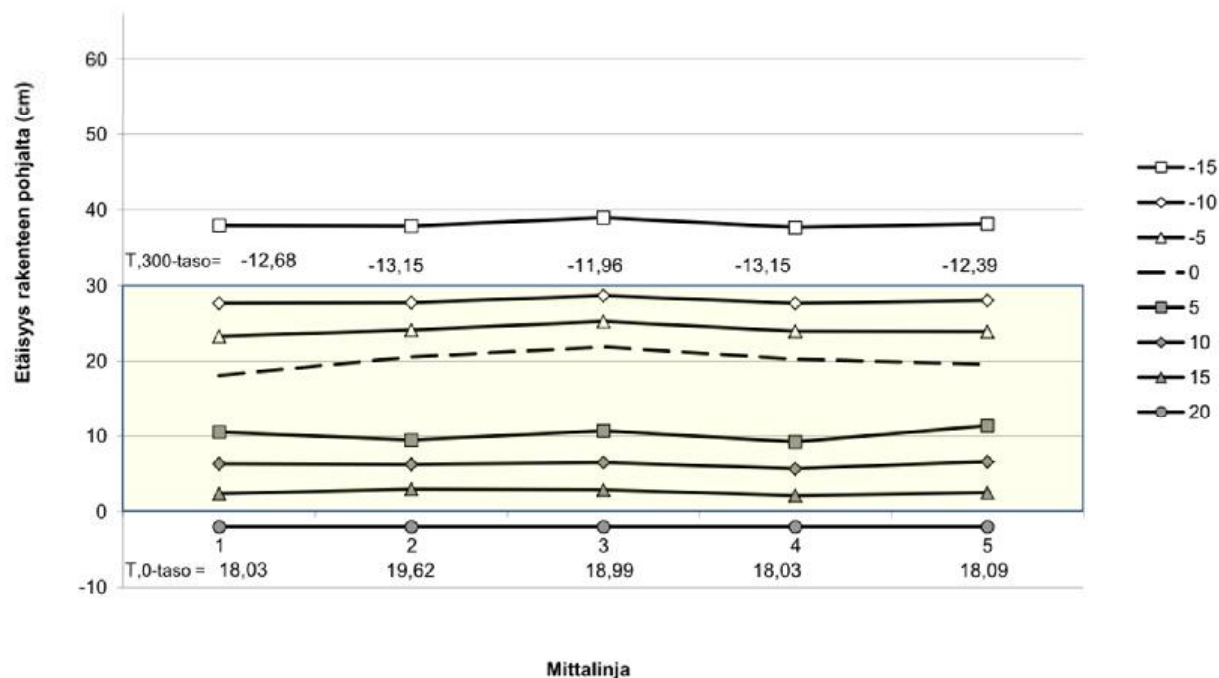
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 20cm, tyvek
TILA: STABIILITILA $T_e = -15,51\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 3.7.2011 16:19
 $T_i = 19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

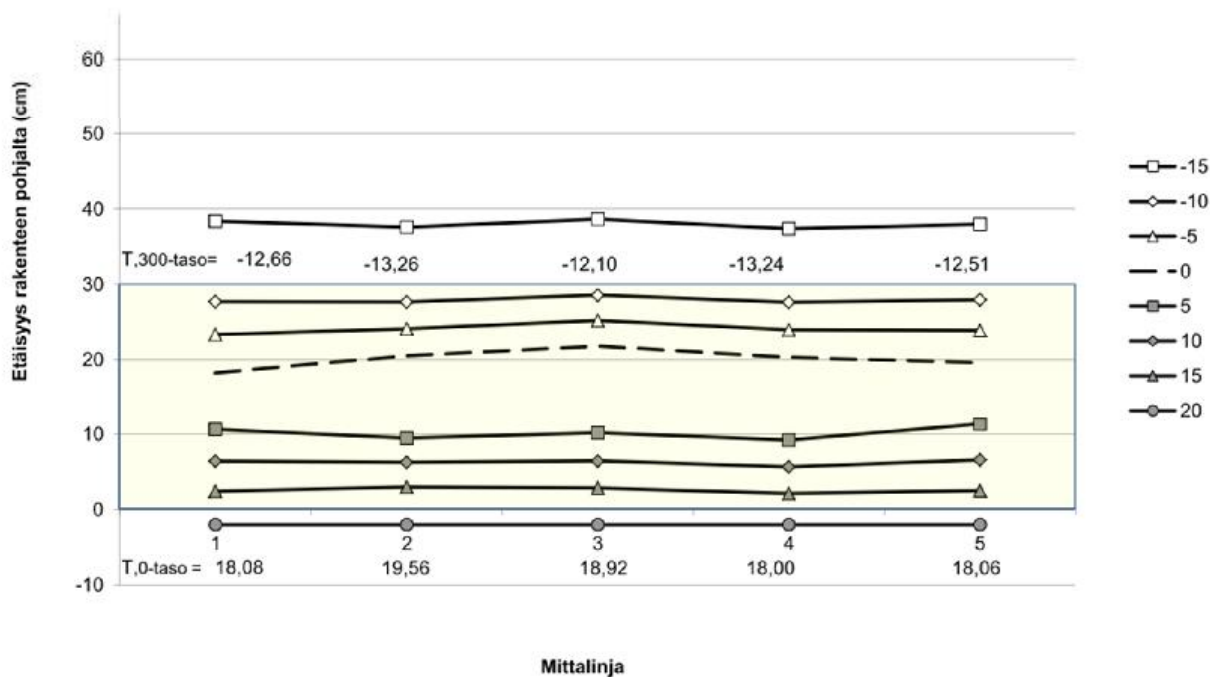
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 20cm, tyvek
TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,54\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 3.7.2011 20:02
 $T_i = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

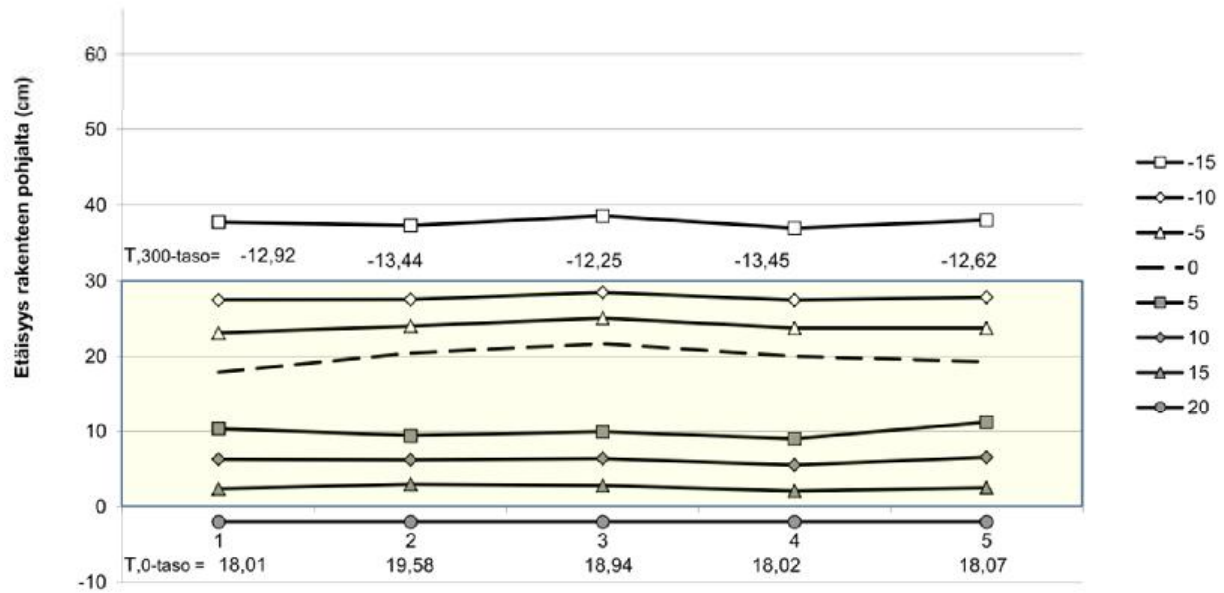
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 20cm, tyvek
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,58\text{ °C}$

AIKA: 3.7.2011 23:39
 $T_i = 20,1\text{ °C}$

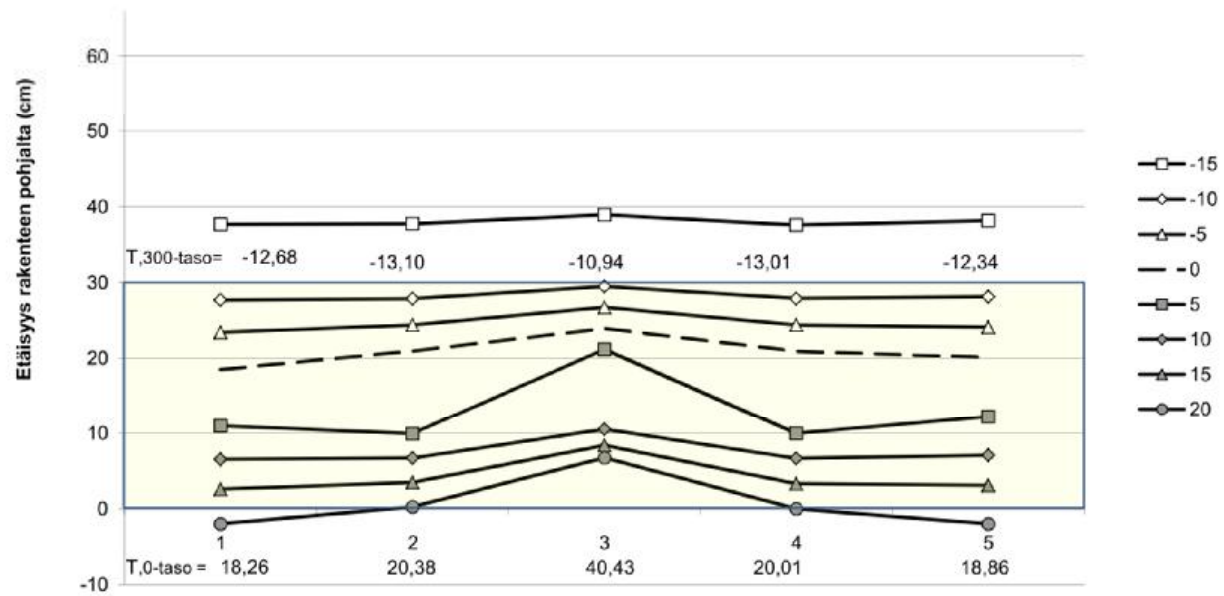
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH300T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 20cm, tyvek
TILA: LAMPPU $T_e = -15,59\text{ °C}$

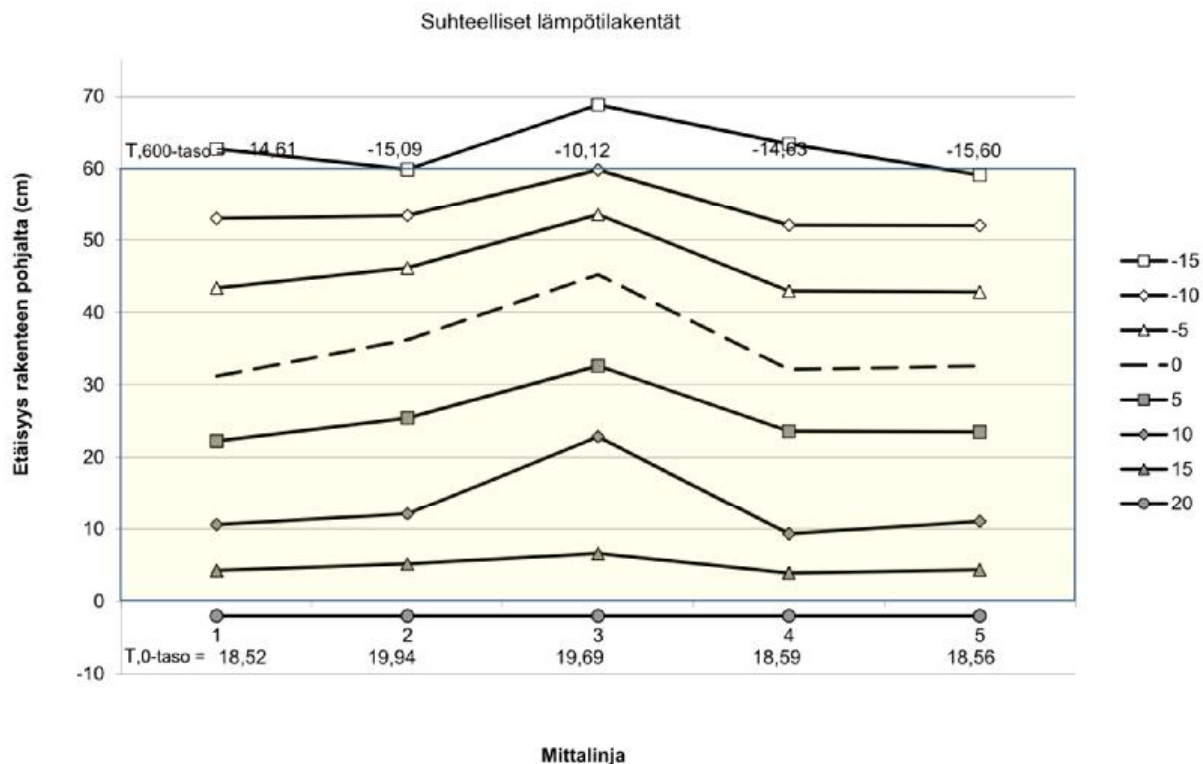
AIKA: 4.7.2011 9:01
 $T_i = 20,3\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



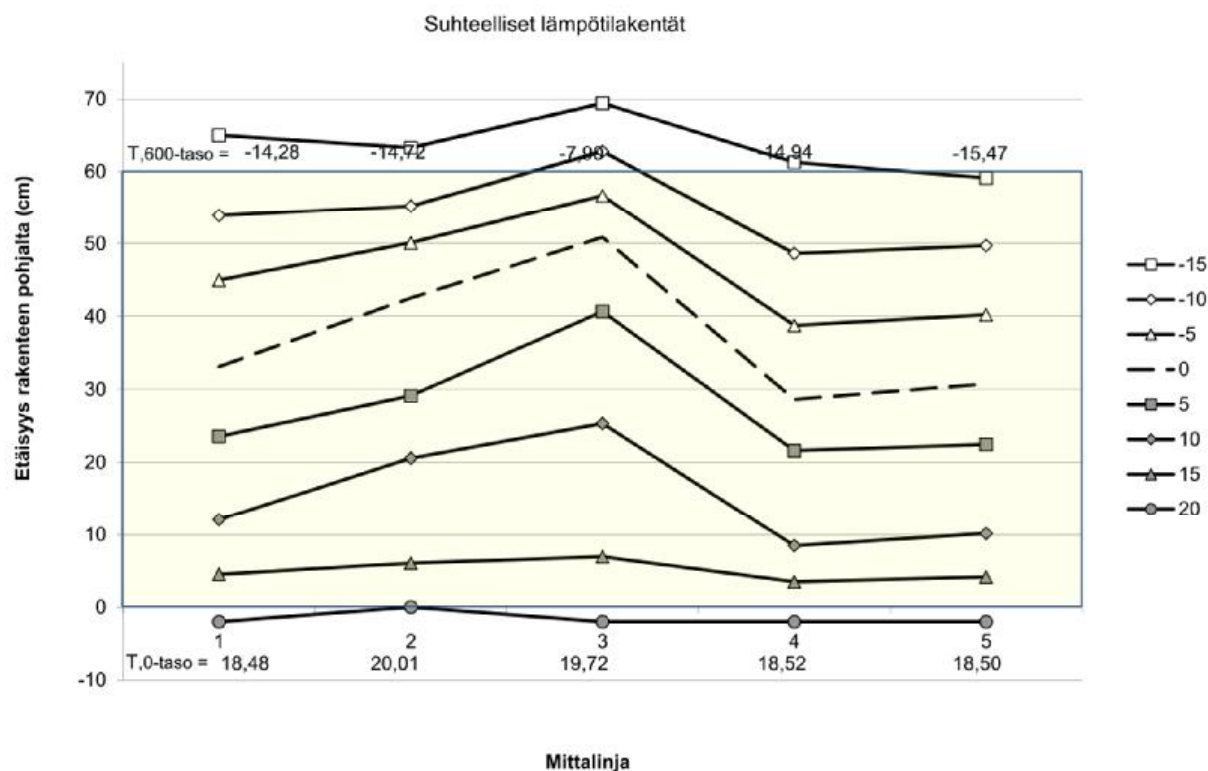
KOE: LEVYPUH600 Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm
 TILA: STABIILITILA $T_e = -15,84\text{ °C}$

AIKA: 4.7.2011 21:21
 $T_i = 19,8\text{ °C}$



KOE: LEVYPUH600 Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm
 TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,63\text{ °C}$

AIKA: 5.7.2011 5:30
 $T_i = 20,3\text{ °C}$

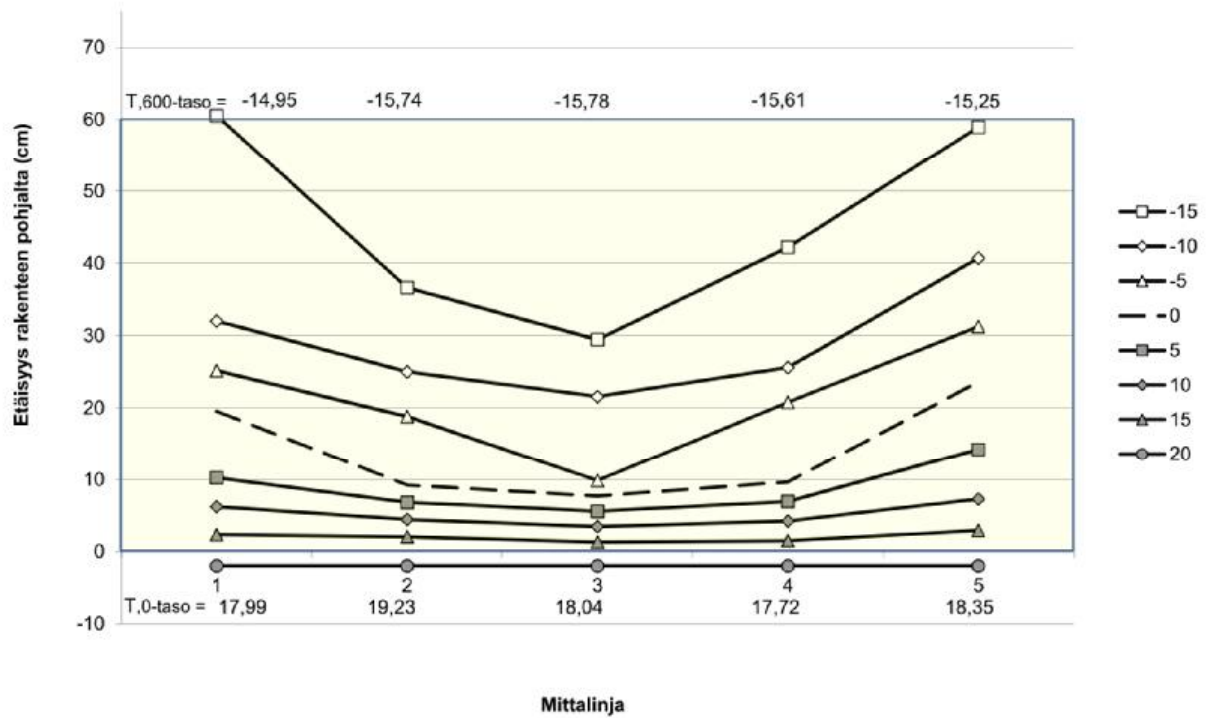


LIITE 1 (30/32)

KOE: LEVYPUH600 Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm
TILA: PÄÄLLITUUL $T_{e} = -15,79\text{ °C}$

AIKA: 5.7.2011 20:46
 $T_{i} = 19,4\text{ °C}$

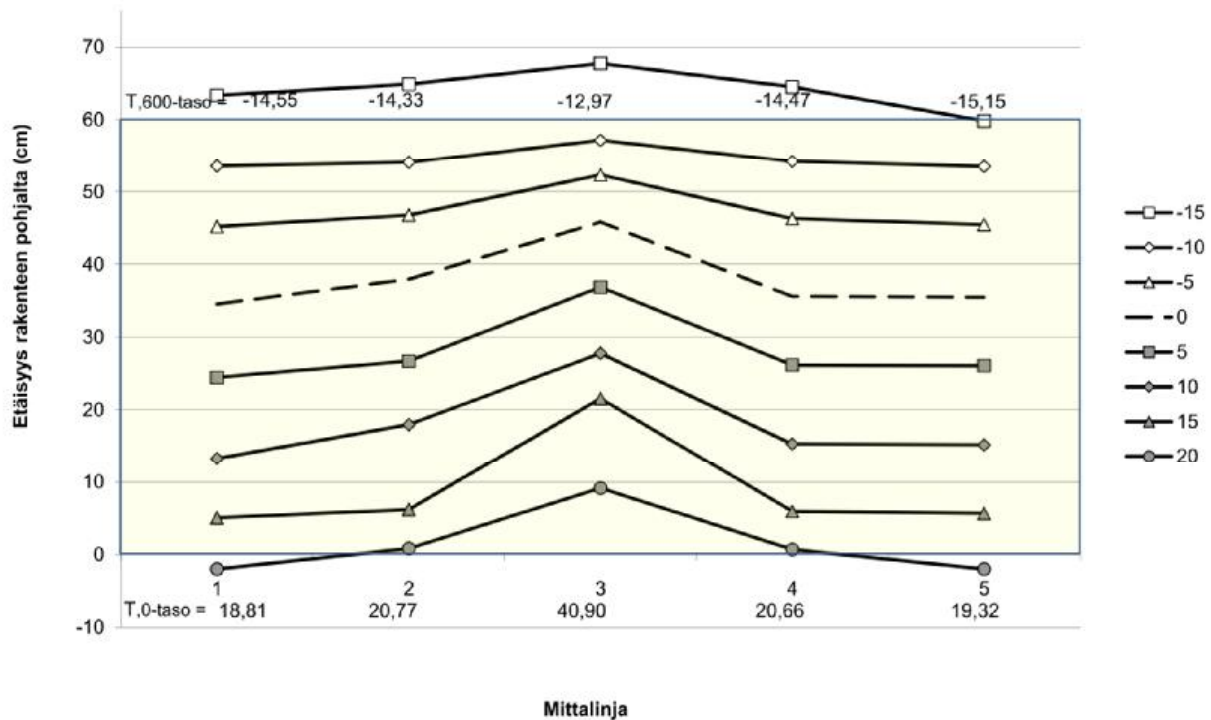
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH600 Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm
TILA: LAMPPU $T_{e} = -15,80\text{ °C}$

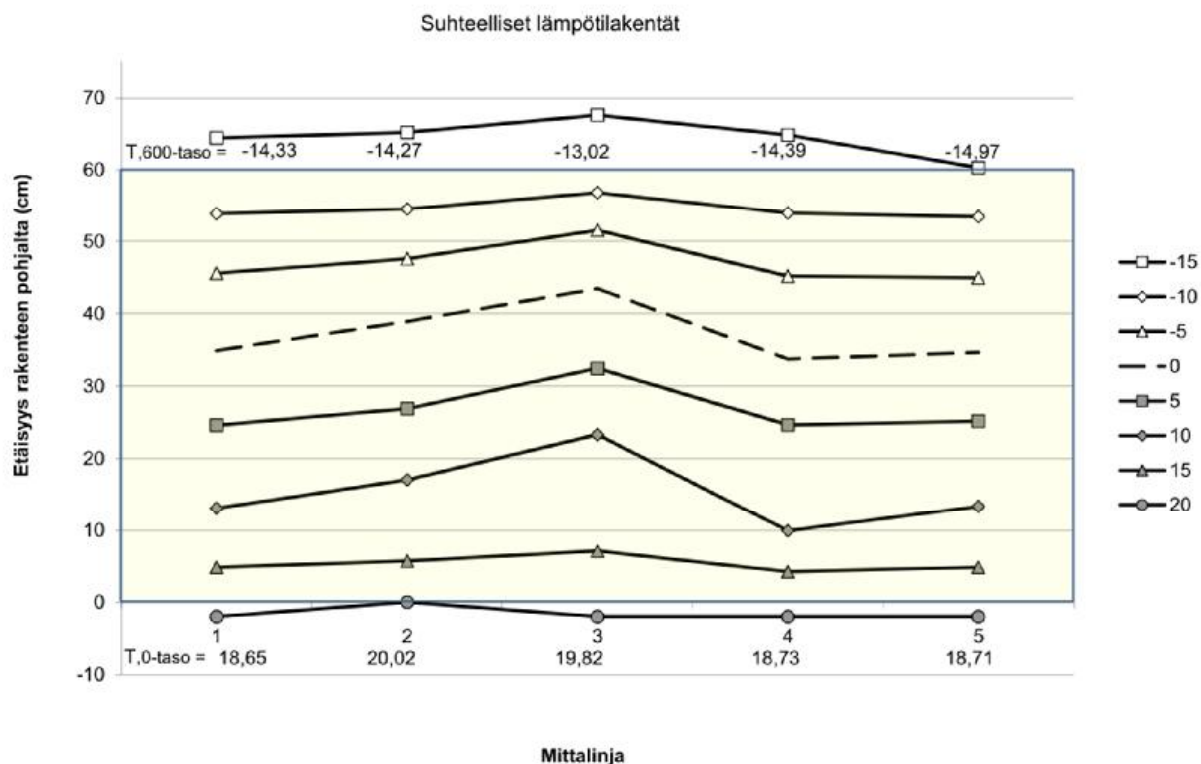
AIKA: 6.7.2011 20:24
 $T_{i} = 19,5\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



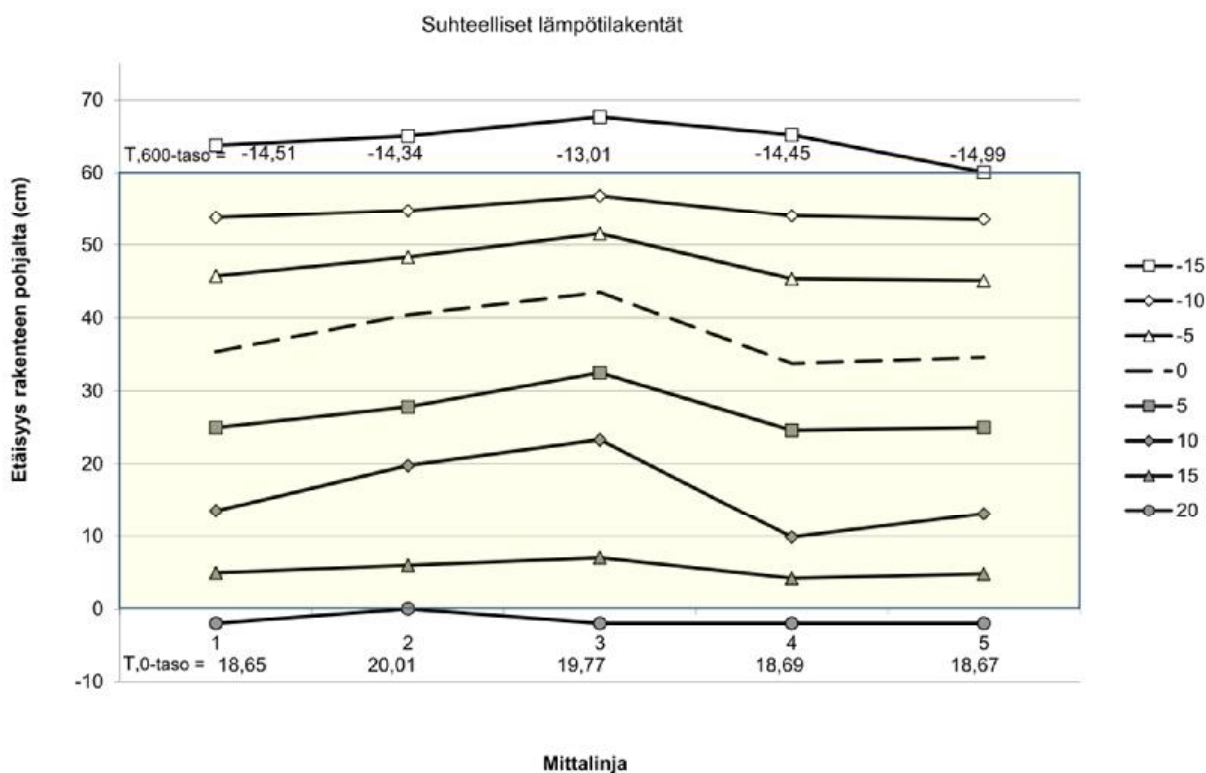
KOE: LEVYPUH600T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm, tyvek
TILA: STABIILITILA $T_e = -15,78\text{ }^{\circ}\text{C}$

AIKA: 7.7.2011 9:04
 $T_i = 19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$



KOE: LEVYPUH600T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm, tyvek
TILA: SIVUTUUL $T_e = -15,71\text{ }^{\circ}\text{C}$

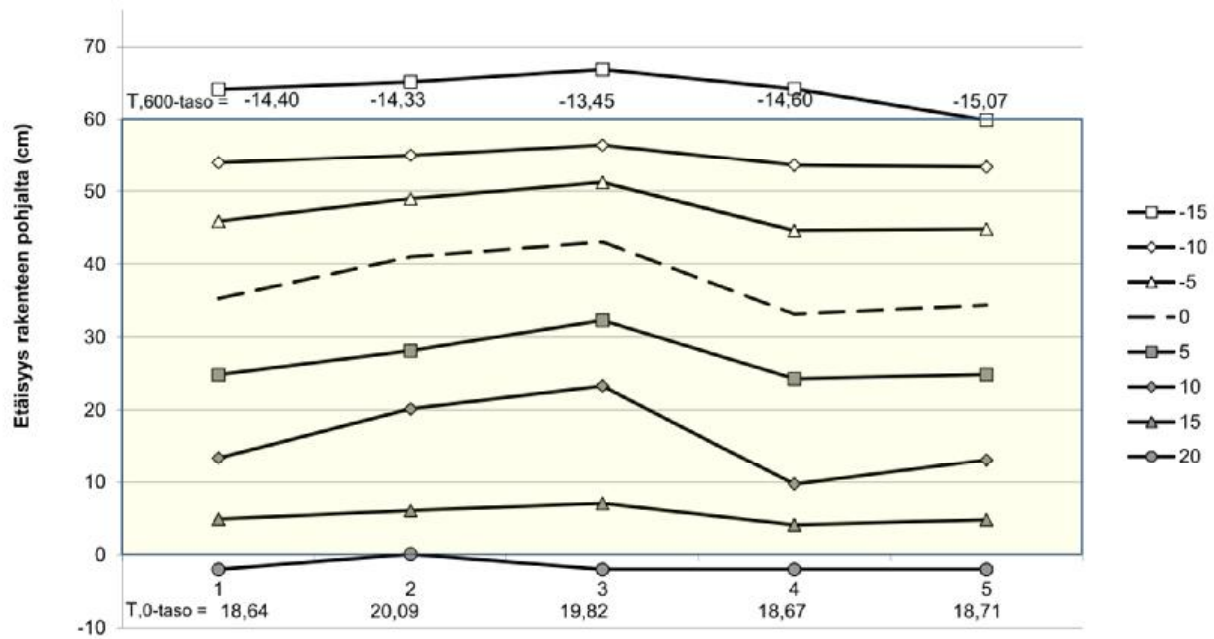
AIKA: 7.7.2011 13:21
 $T_i = 20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$



KOE: LEVYPUH600T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm, tyvek
TILA: PÄÄLLITUUL $T_e = -15,74\text{ °C}$

AIKA: 7.7.2011 18:04
 $T_i = 20,3\text{ °C}$

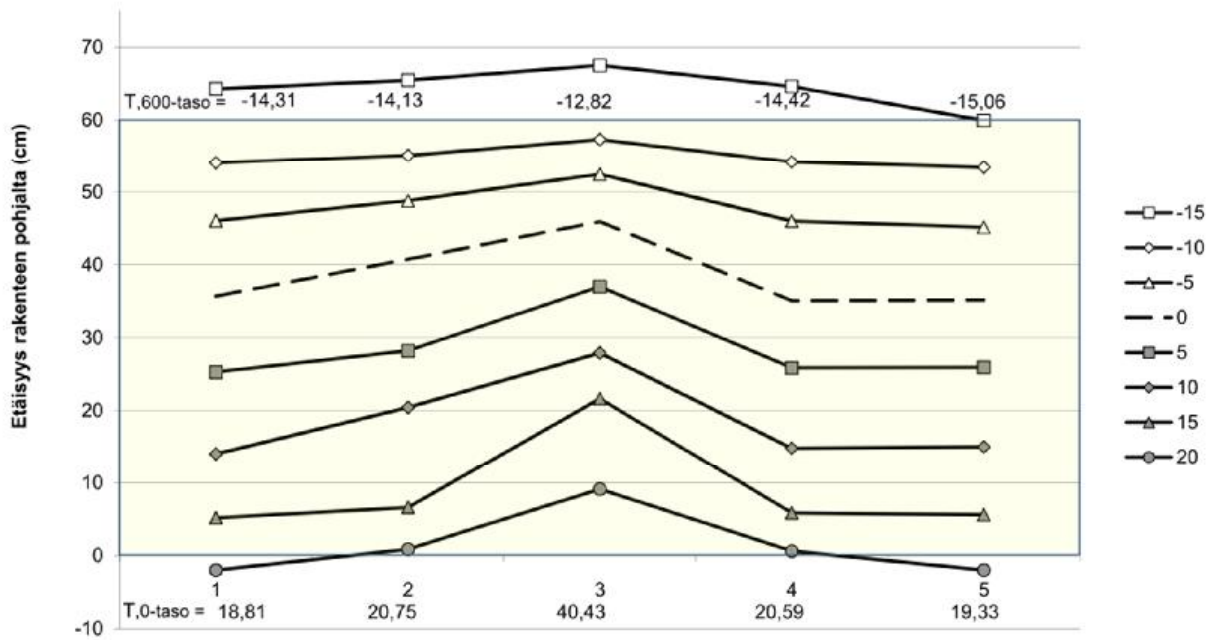
Suhteelliset lämpötilakentät



KOE: LEVYPUH600T Lasilevyvilla 10cm ja -puhallusvilla 50cm, tyvek
TILA: LAMPPU $T_e = -15,86\text{ °C}$

AIKA: 8.7.2011 7:19
 $T_i = 20,0\text{ °C}$

Suhteelliset lämpötilakentät



KOE

PUU300

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

22.4.2012 8:31

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

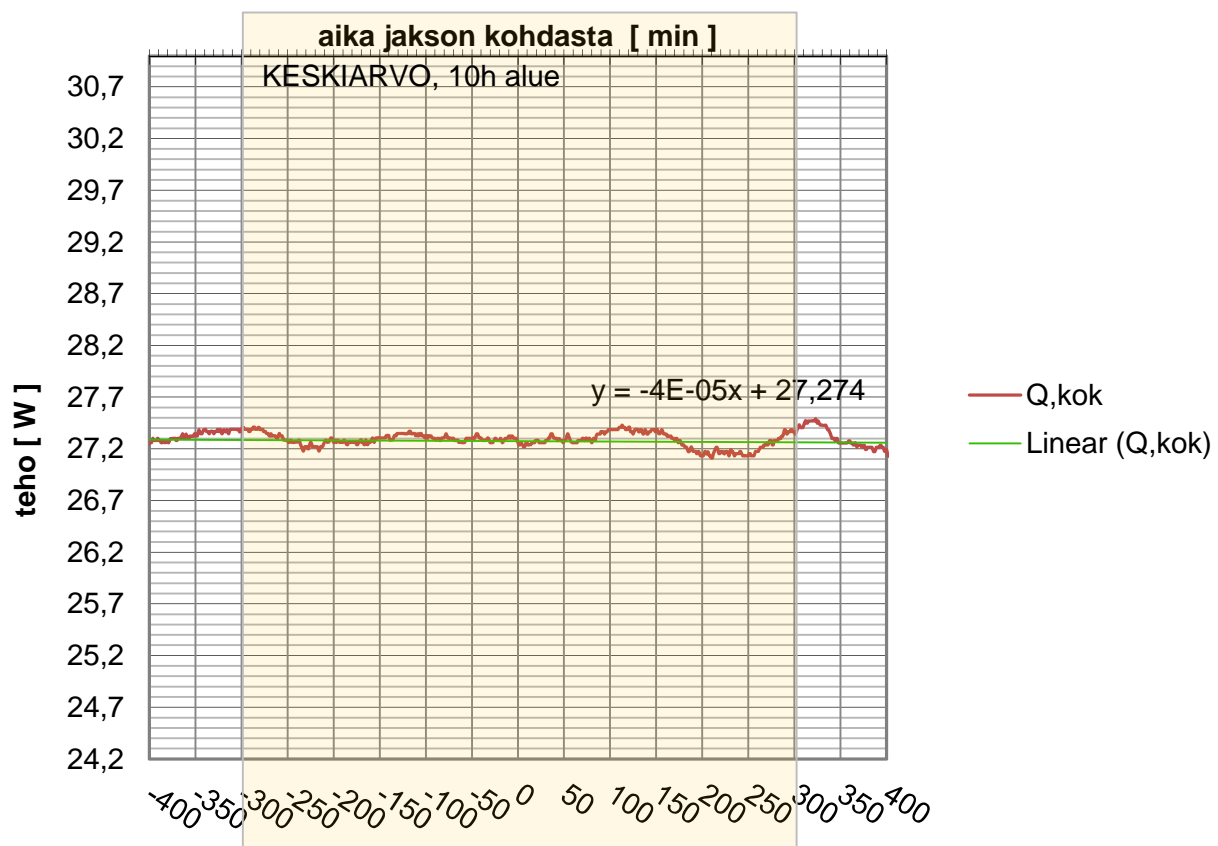
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

2500

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	19,94	19,99	20,10		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	19,92	19,99	20,10		20,00	
							-0,53
T _{si} [°C]	19,24	19,36	19,49	19,70	19,58	19,47	
T _{si} (KA.) [°C]	19,23	19,36	19,48	19,70	19,58	19,47	
							-32,61
T _{se} [°C]	-12,35	-12,30	-13,04	-12,50	-12,86	-12,61	
T _{se} (KA.) [°C]	-12,34	-12,30	-13,03	-12,50	-12,86	-12,61	
							-1,24
T _e [°C]	-14,26	-13,04	-14,29			-13,86	
T _e (KA.) [°C]	-14,24	-13,03	-14,28			-13,85	
Q, kok [W]	27,26 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	27,37	
Q, joht [W]	6,18				Q, joht (KA.) [W]	6,20	

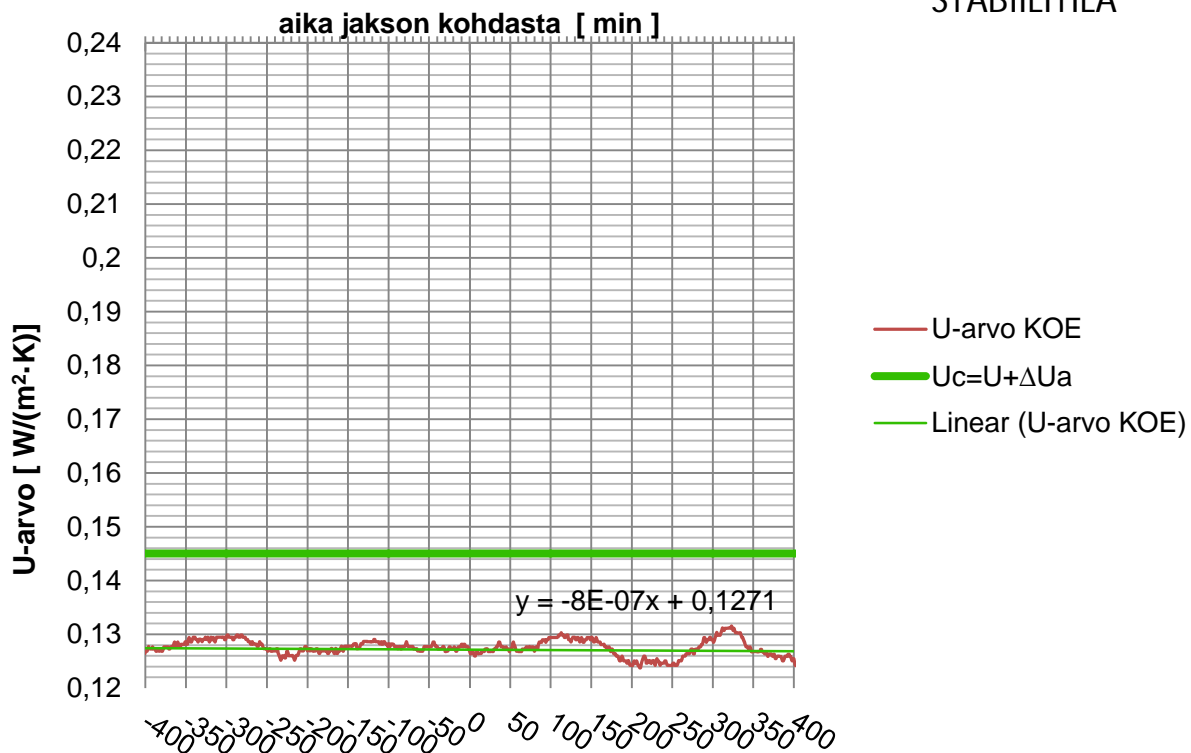
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUU300

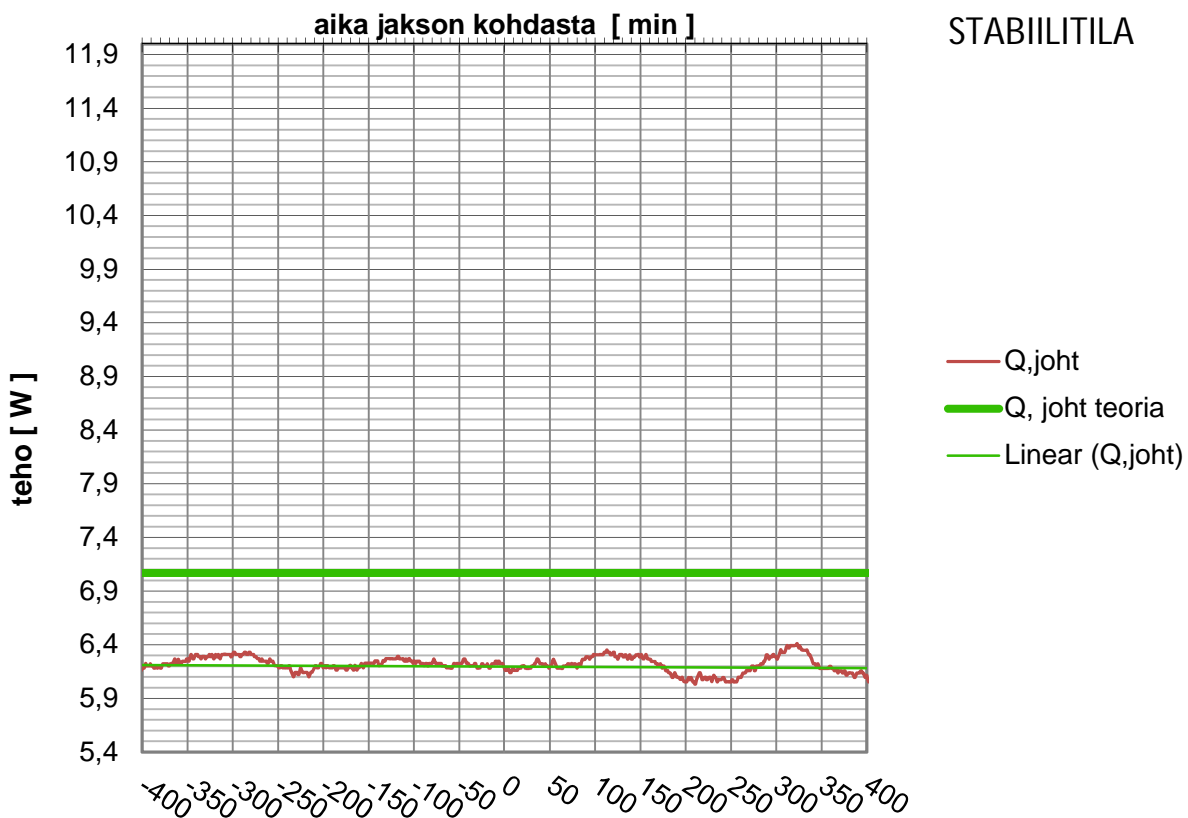
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU300

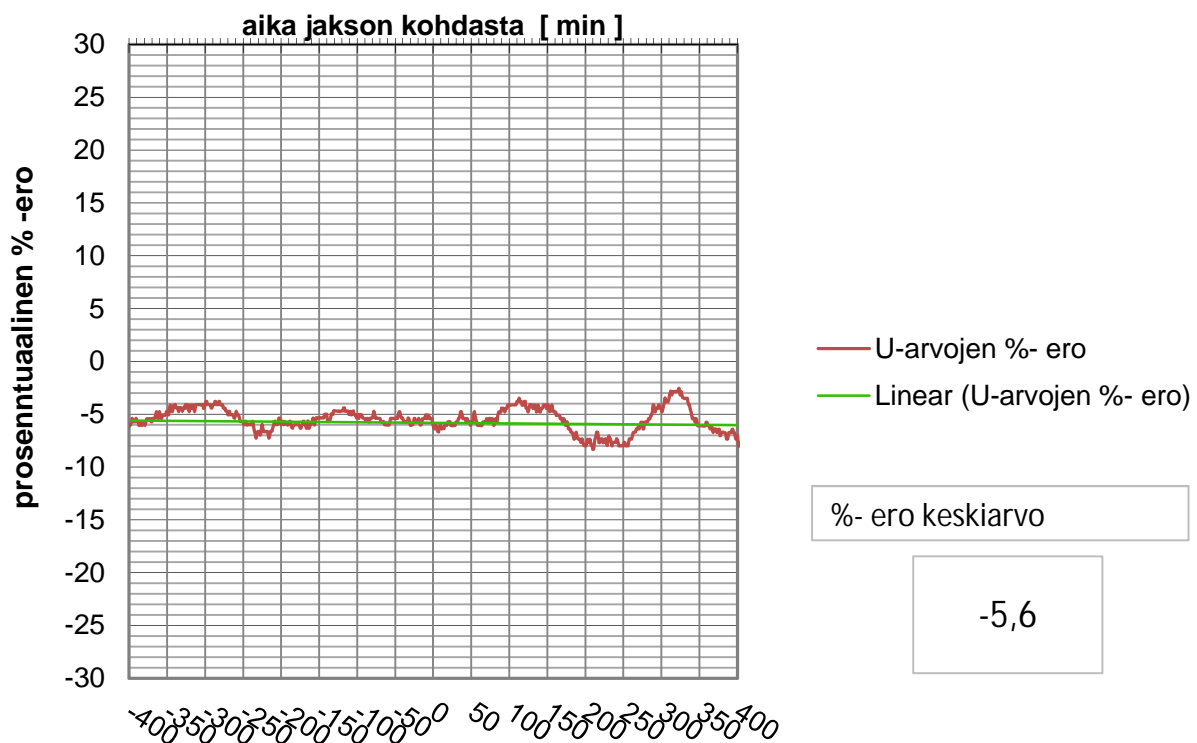
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU300

STABIILITILA



Nusseltin luku

0,98

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

KOE

PUU300

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

23.4.2012 17:51

JAKSO

4500

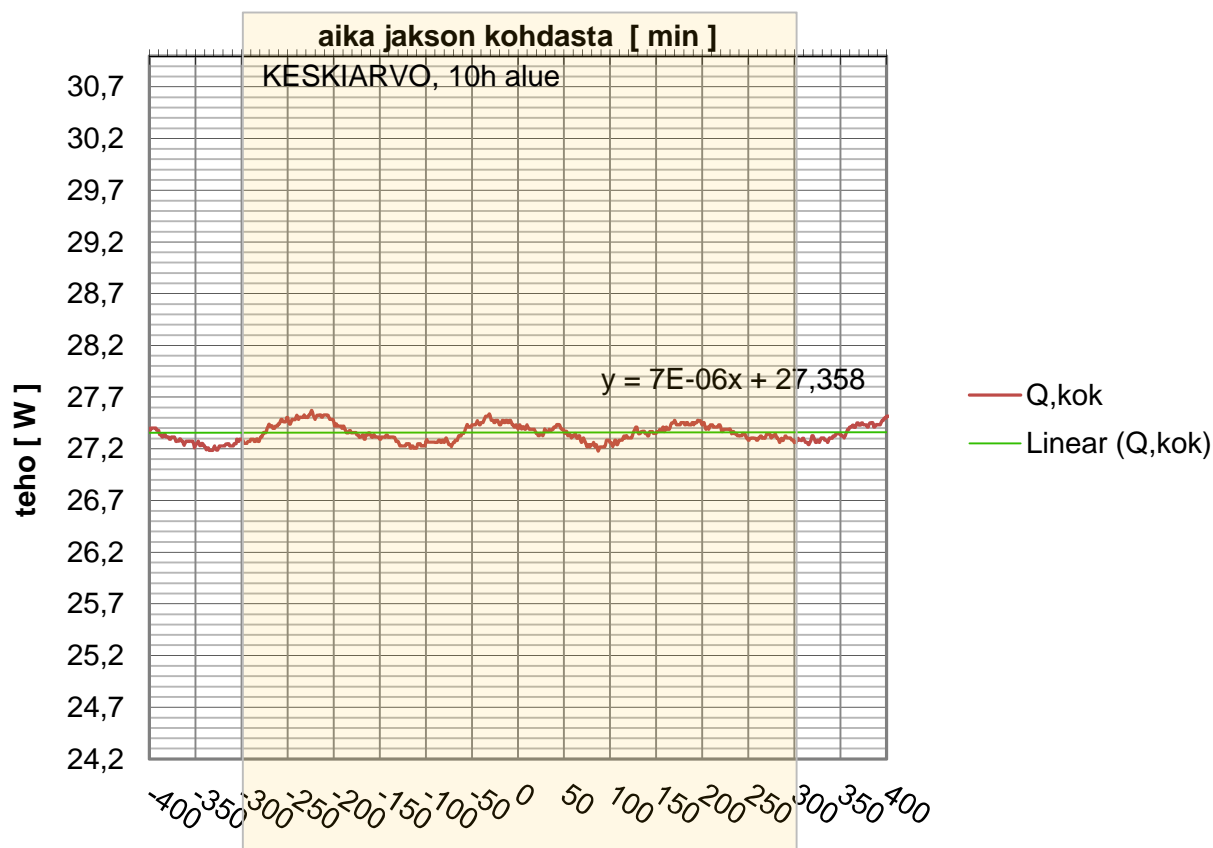
ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIAARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	19,96	19,97	20,09		20,00	
T _i (KA.) [°C]	20,00	19,96	19,97	20,09		20,00	
							-0,51
T _{si} [°C]	19,27	19,35	19,61	19,70	19,53	19,49	
T _{si} (KA.) [°C]	19,27	19,35	19,61	19,70	19,53	19,49	
							-32,87
T _{se} [°C]	-11,12	-12,92	-14,08	-12,32	-13,77	-12,84	
T _{se} (KA.) [°C]	-11,11	-12,95	-14,12	-12,33	-13,80	-12,86	
							-1,53
T _e [°C]	-14,45	-14,08	-14,61			-14,38	
T _e (KA.) [°C]	-14,46	-14,12	-14,61			-14,40	
Q, kok [W]	27,41 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	27,27	
Q, joht [W]	6,24				Q, joht (KA.) [W]	6,21	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

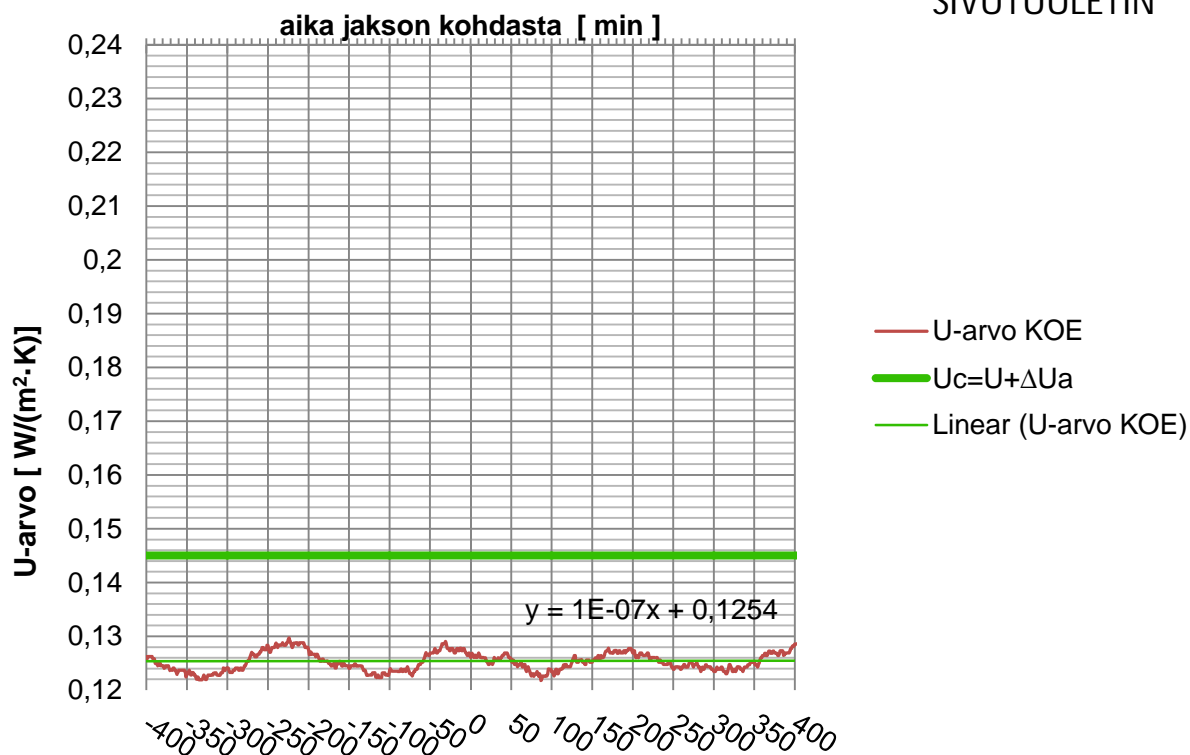


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUU300

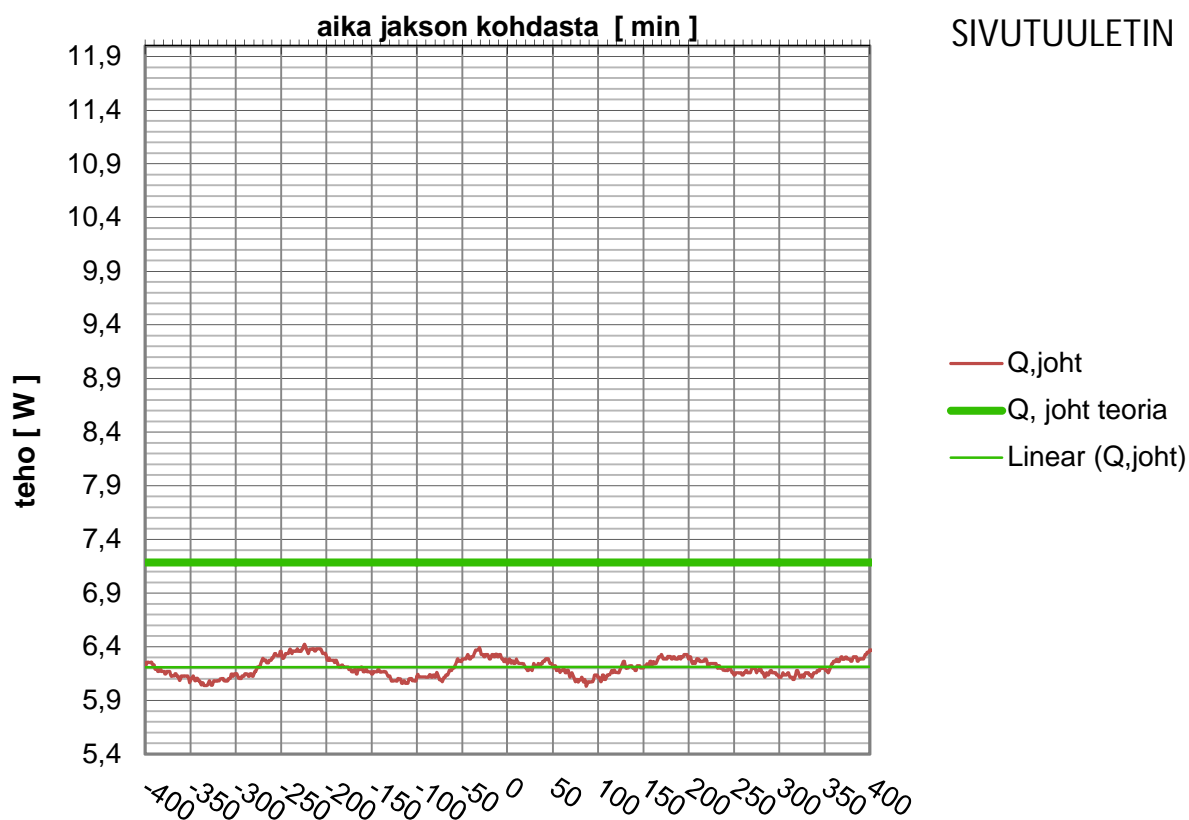
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU300

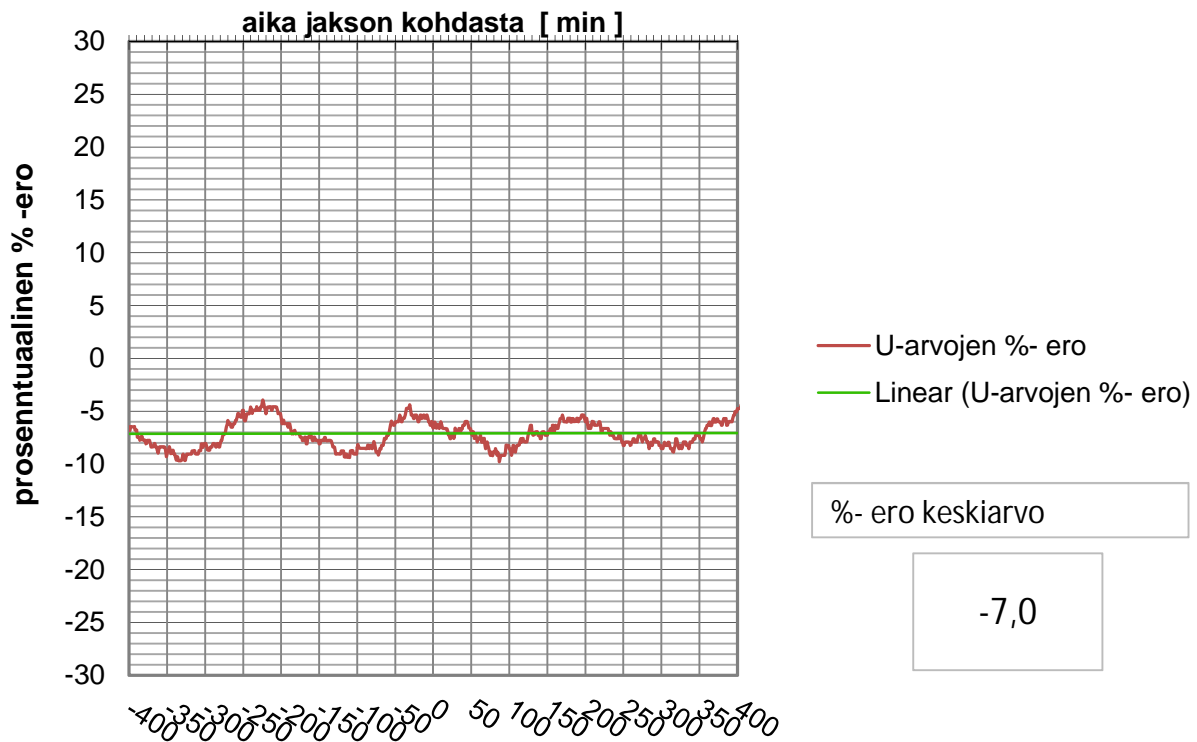
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU300

SIVUTUULETIN



Nusseltin luku

0,97

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

KOE

PUU600

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

27.1.2012 3:29

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

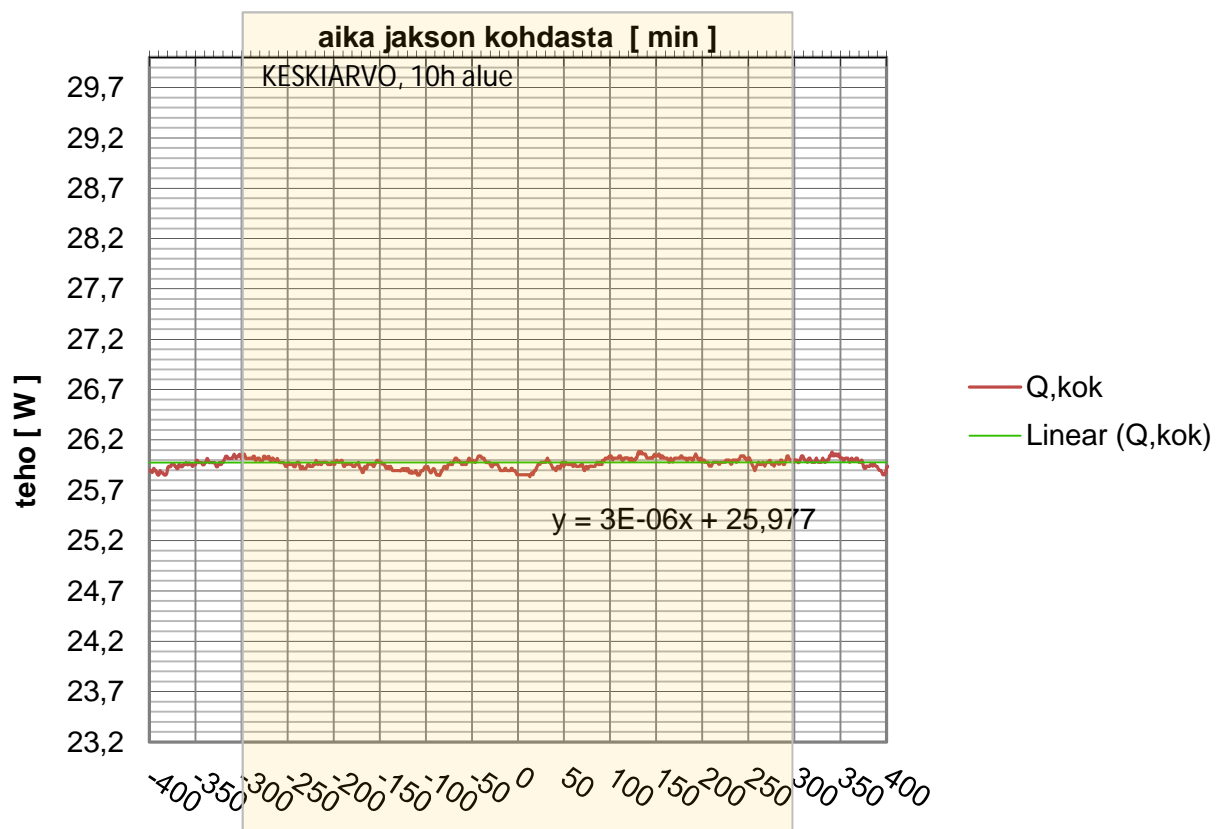
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

9200

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,02	19,99	19,94	20,07		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,01	19,98	19,94	20,06		20,00	
							-0,38
T,si [°C]	19,42	19,48	19,84	19,79	19,59	19,62	
T,si (KA.) [°C]	19,42	19,47	19,85	19,79	19,58	19,62	
							-35,14
T,se [°C]	-15,42	-15,37	-15,37	-15,39	-15,39	-15,39	
T,se (KA.) [°C]	-15,18	-15,14	-15,13	-15,15	-15,12	-15,14	
							-0,23
T,e [°C]	-15,77	-15,51				-15,64	
T,e (KA.) [°C]	-15,52	-15,22				-15,37	
Q, kok [W]	25,85 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,99	
Q, joht [W]	4,43				Q, joht (KA.) [W]	4,55	

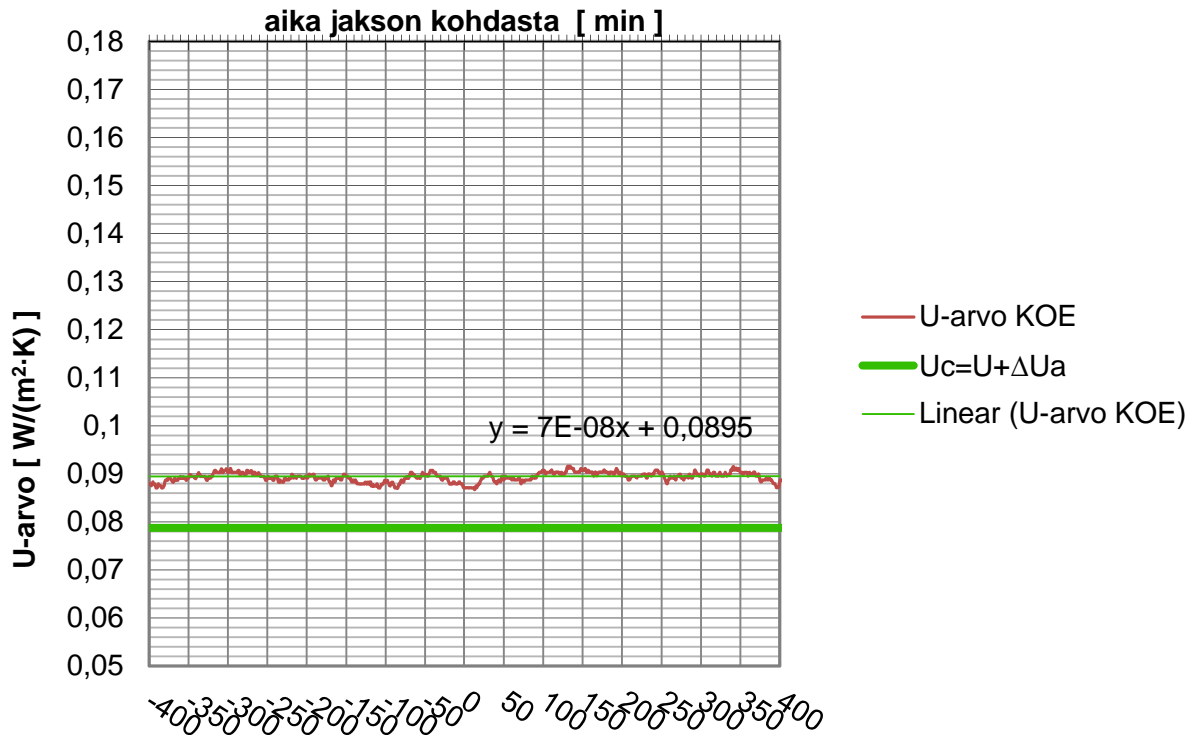
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

PUU600

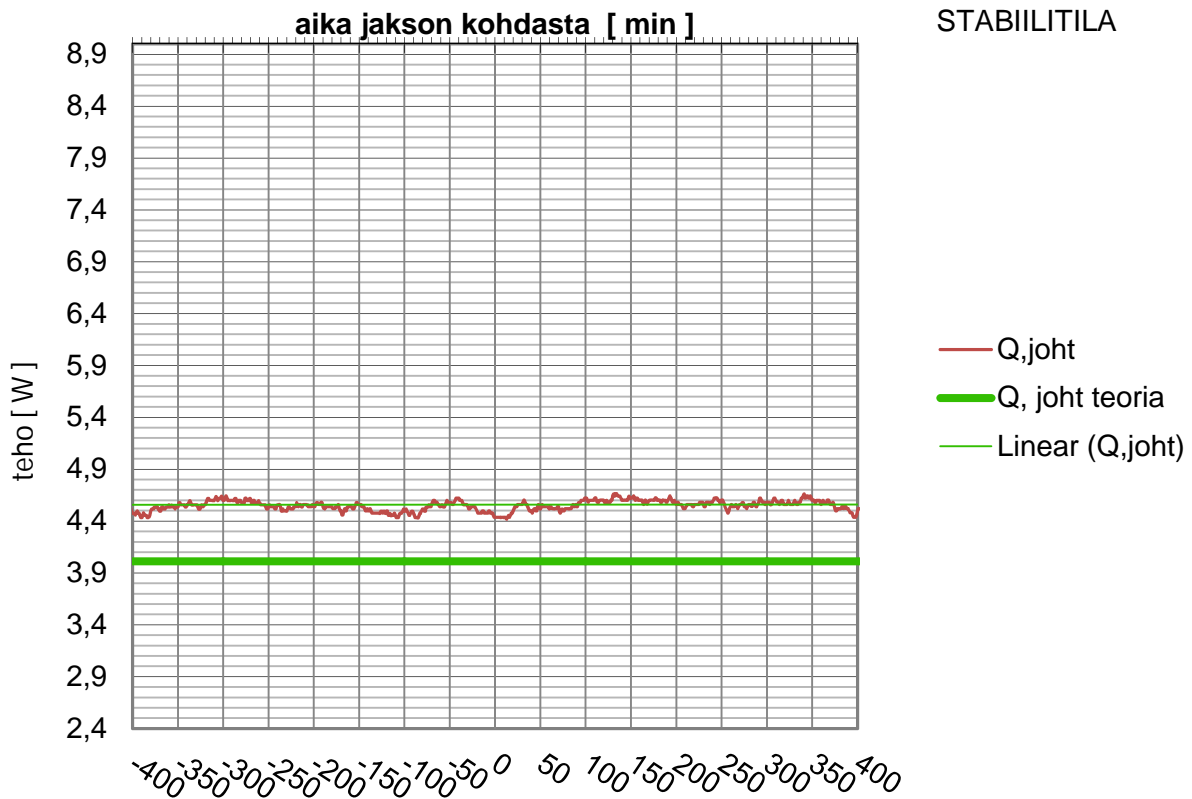
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU600

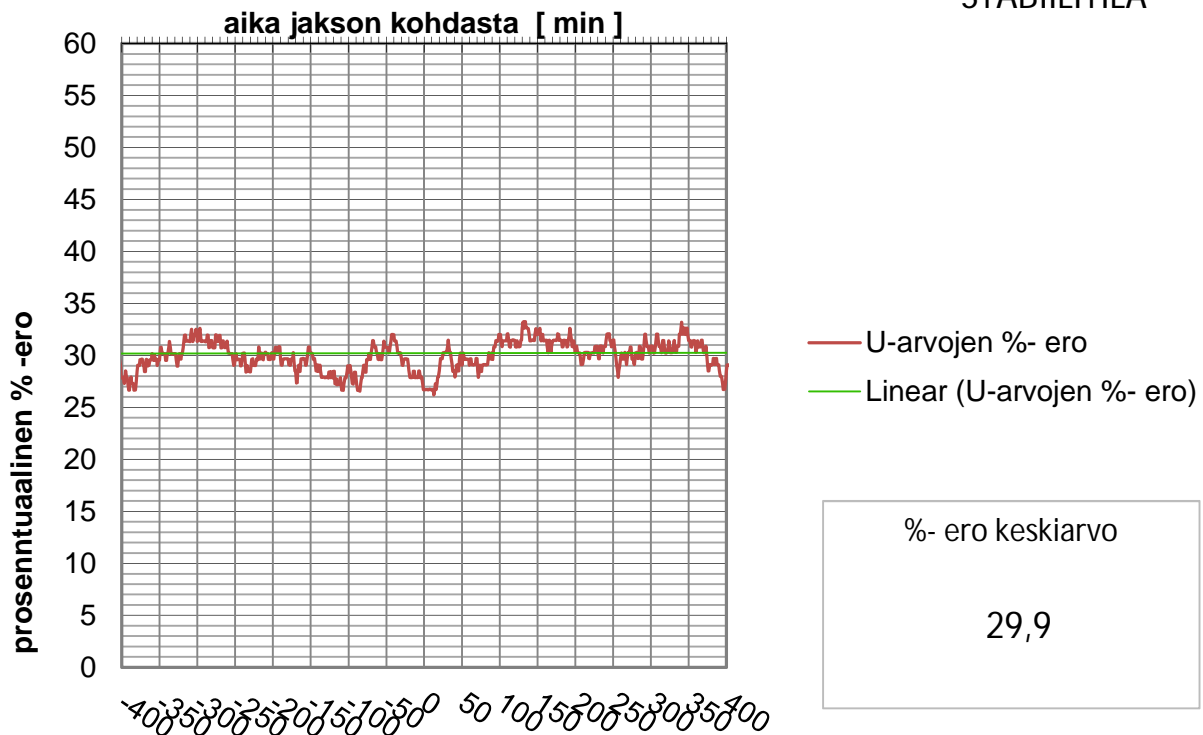
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU600

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,31

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUU600

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

29.1.2012 9:39

JAKSO

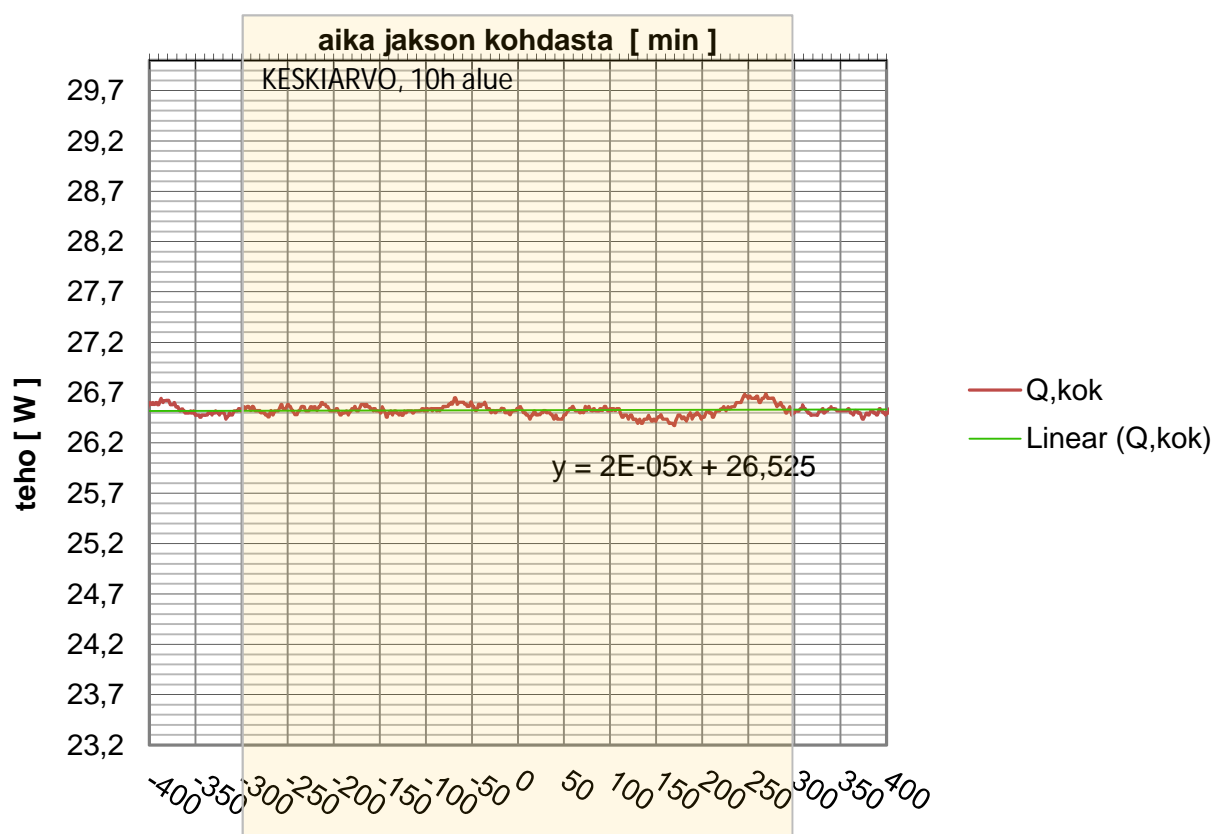
12450

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,01	19,99	19,95	20,06		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,01	19,99	19,94	20,06		20,00	
							-0,39
T,si [°C]	19,40	19,40	19,84	19,79	19,58	19,60	
T,si (KA.) [°C]	19,40	19,41	19,84	19,79	19,59	19,61	
							-34,81
T,se [°C]	-14,84	-14,88	-14,82	-14,91	-14,46	-14,78	
T,se (KA.) [°C]	-14,87	-14,92	-14,85	-14,94	-14,47	-14,81	
							-0,40
T,e [°C]	-15,56	-14,90				-15,23	
T,e (KA.) [°C]	-15,51	-14,93				-15,22	
Q, kok [W]	26,56 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	26,50	
Q, joht [W]	5,21				Q, joht (KA.) [W]	5,19	

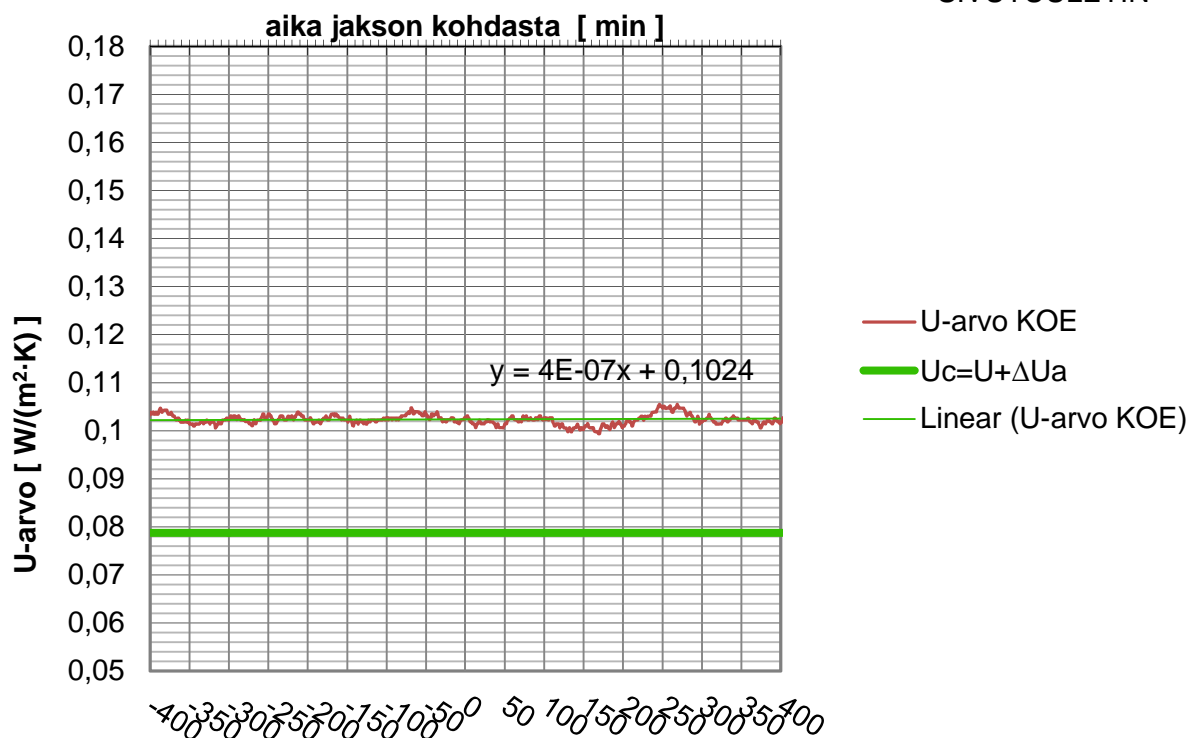
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUU600

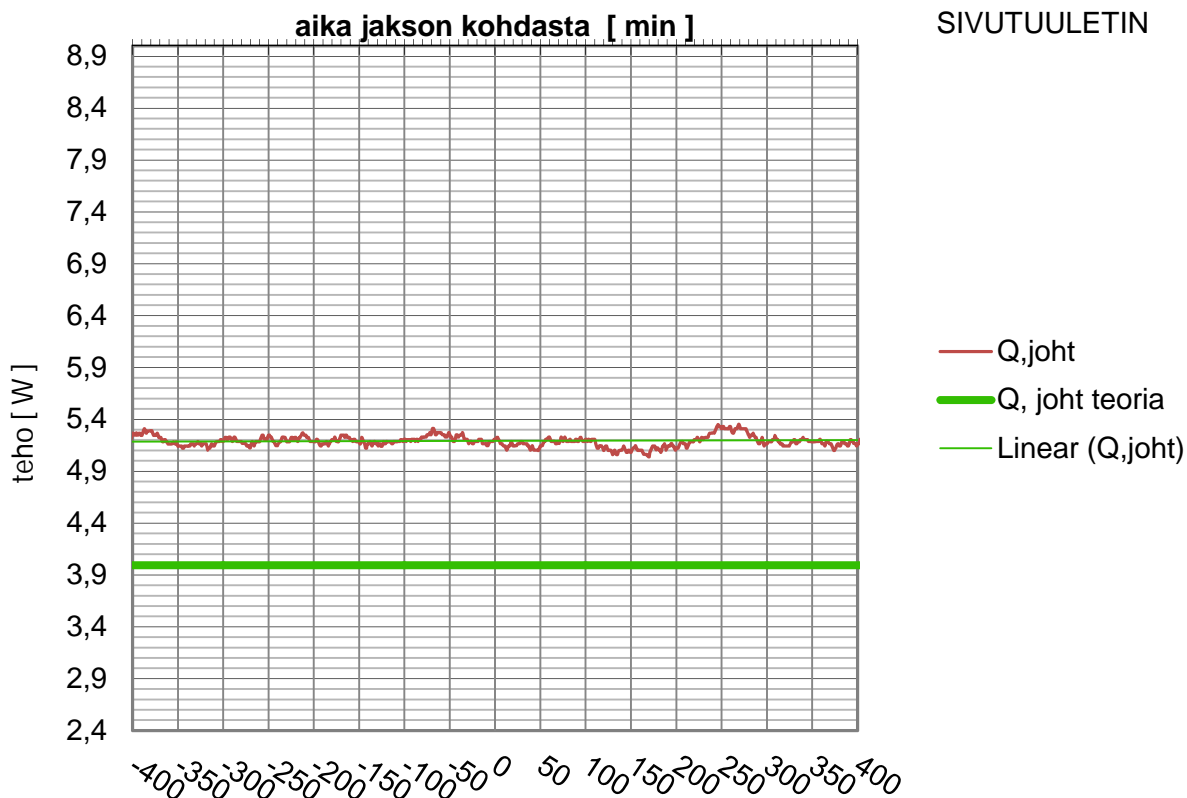
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU600

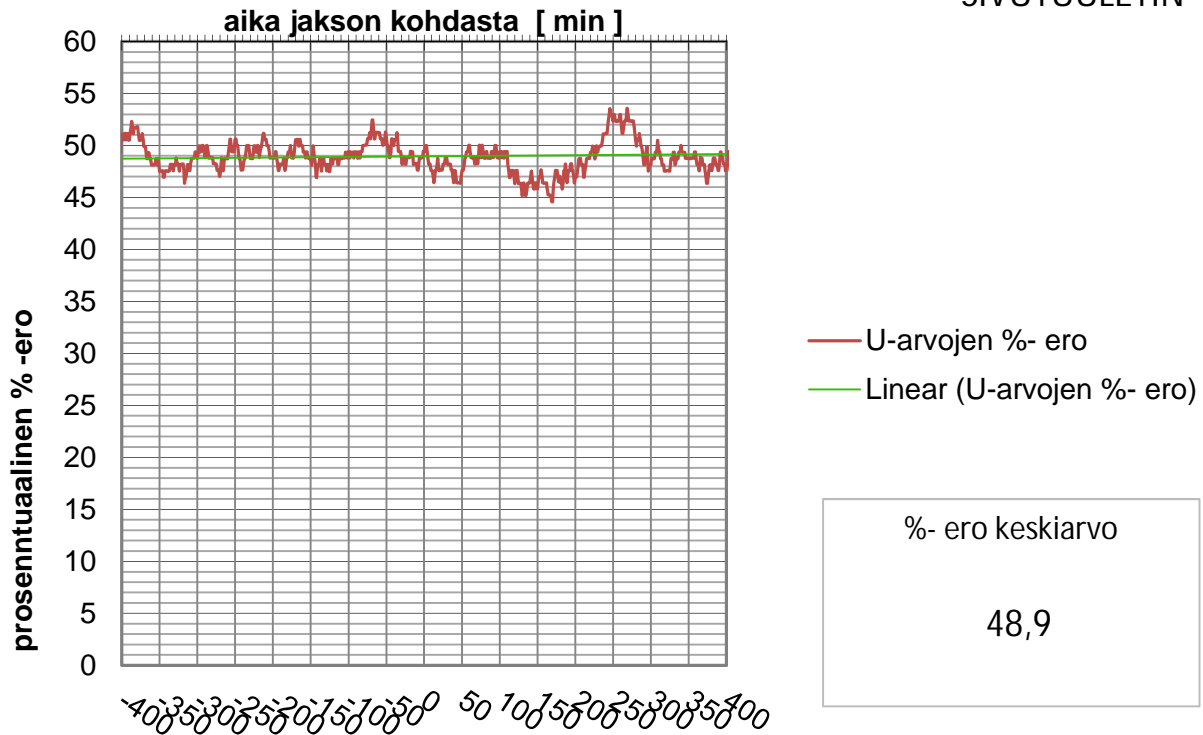
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU600

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,51

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUU600

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

AIKA

4.2.2012 13:09

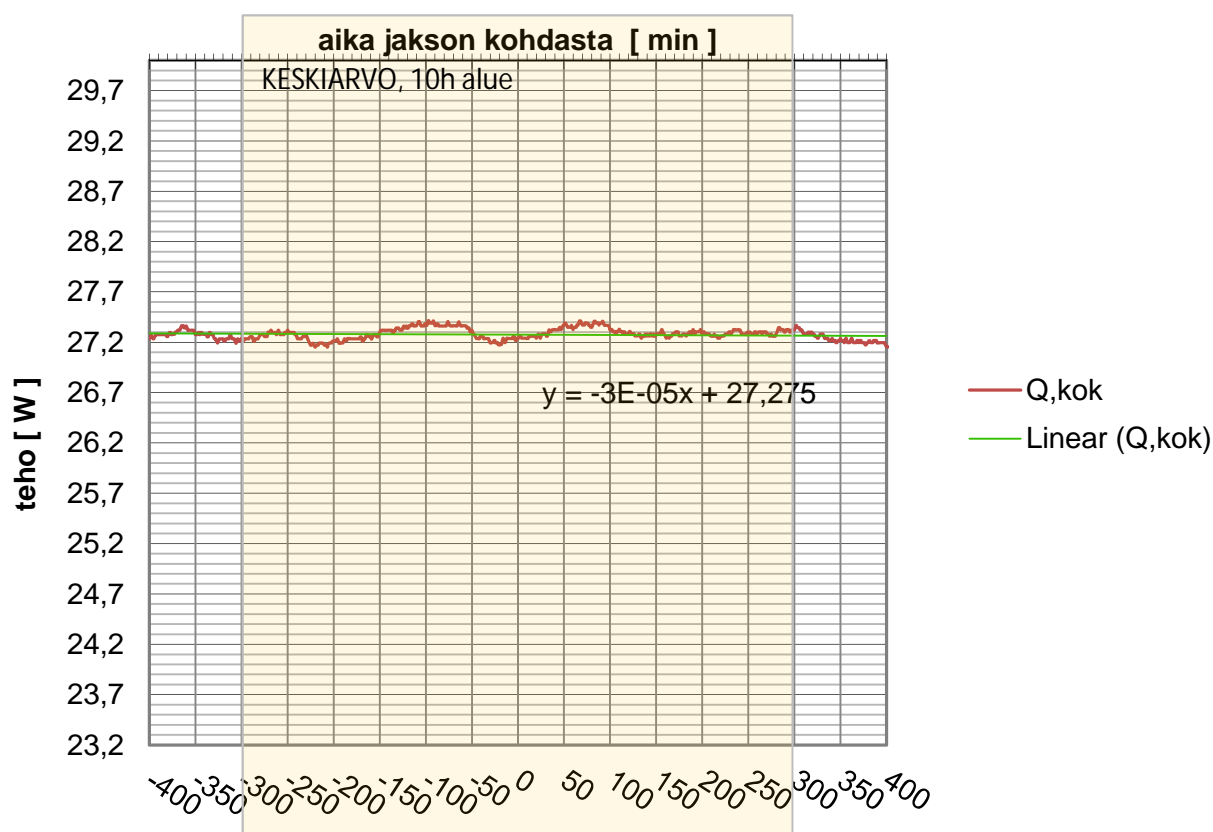
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

21300

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	20,00	19,88	20,03	20,09		20,00	
T _i (KA.) [°C]	20,00	19,86	20,04	20,10		20,00	
							-0,47
T _{si} [°C]	19,37	19,47	19,30	19,77	19,72	19,53	
T _{si} (KA.) [°C]	19,37	19,47	19,30	19,77	19,72	19,52	
							-35,09
T _{se} [°C]	-15,08	-15,02	-15,03	-15,07	-15,04	-15,05	
T _{se} (KA.) [°C]	-15,11	-15,05	-15,07	-15,12	-15,08	-15,09	
							-0,27
T _e [°C]	-15,28	-15,20				-15,24	
T _e (KA.) [°C]	-15,47	-15,25				-15,36	
Q, kok [W]	27,26 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	27,34	
Q, joht [W]	5,79				Q, joht (KA.) [W]	5,84	

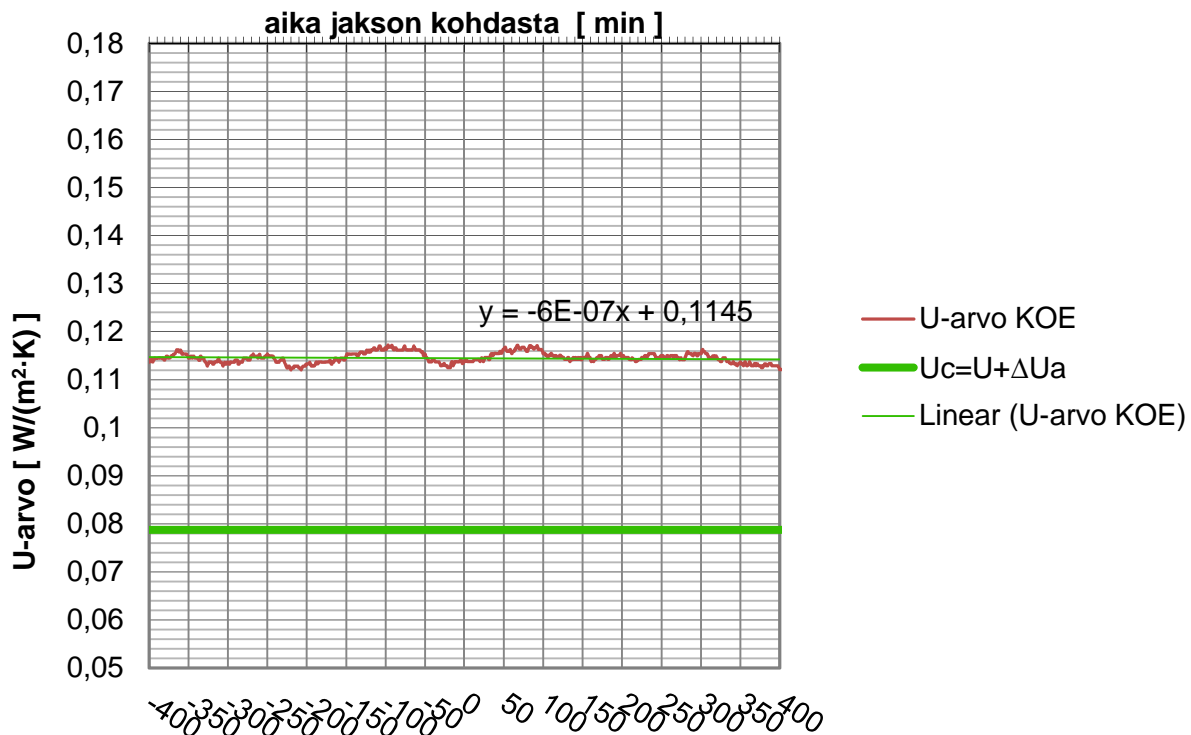
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

PUU600

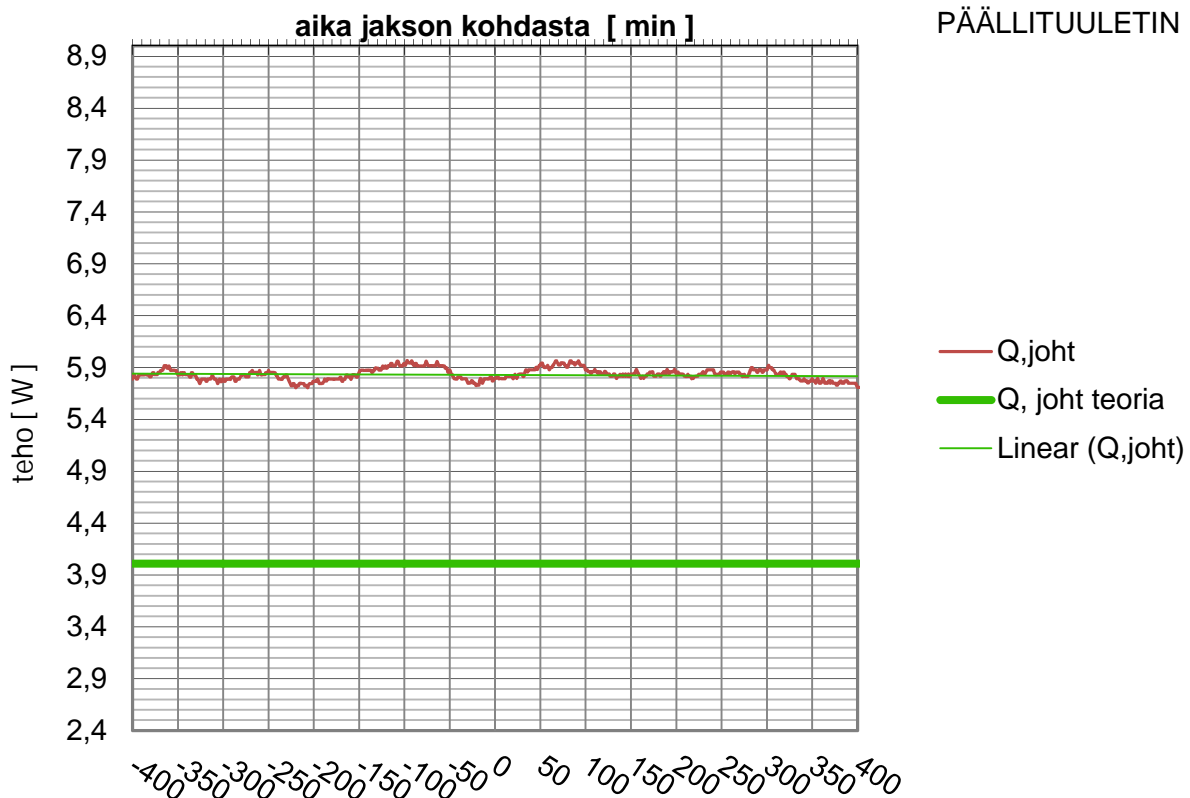
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU600

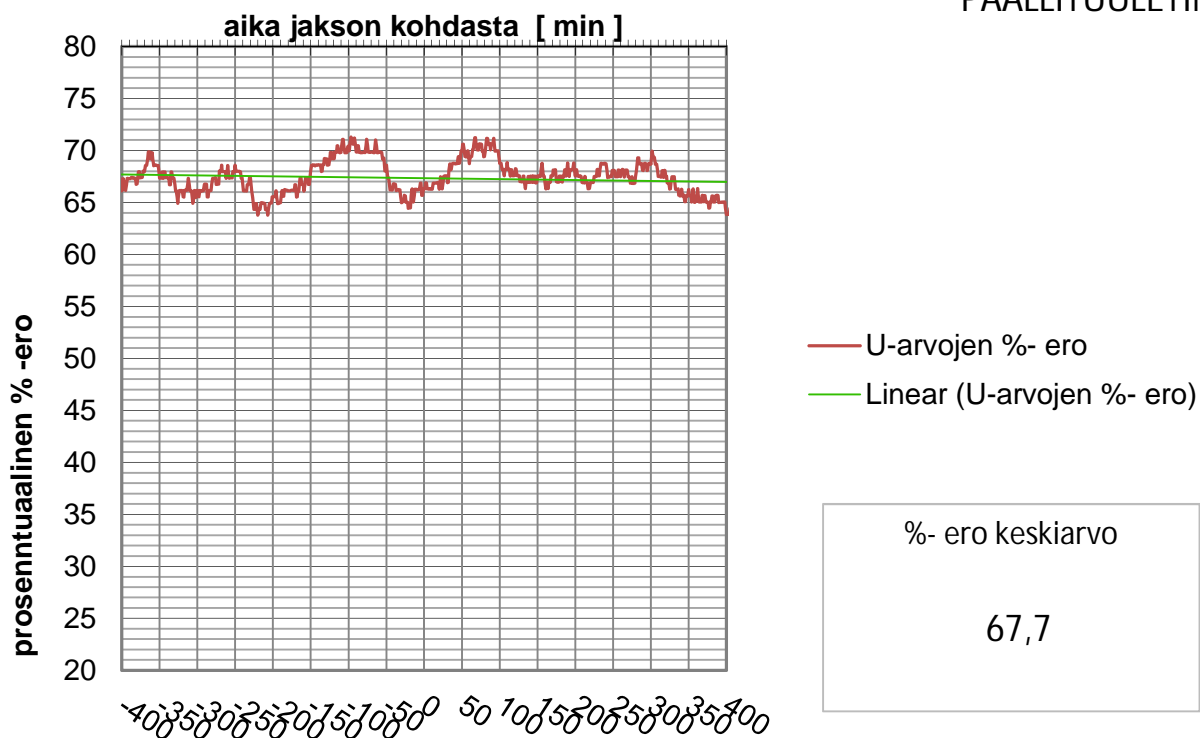
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU600

PÄÄLLITUULETIN



Nusselt in luku

1,70

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUU600T

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

11.2.2012 13:24

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

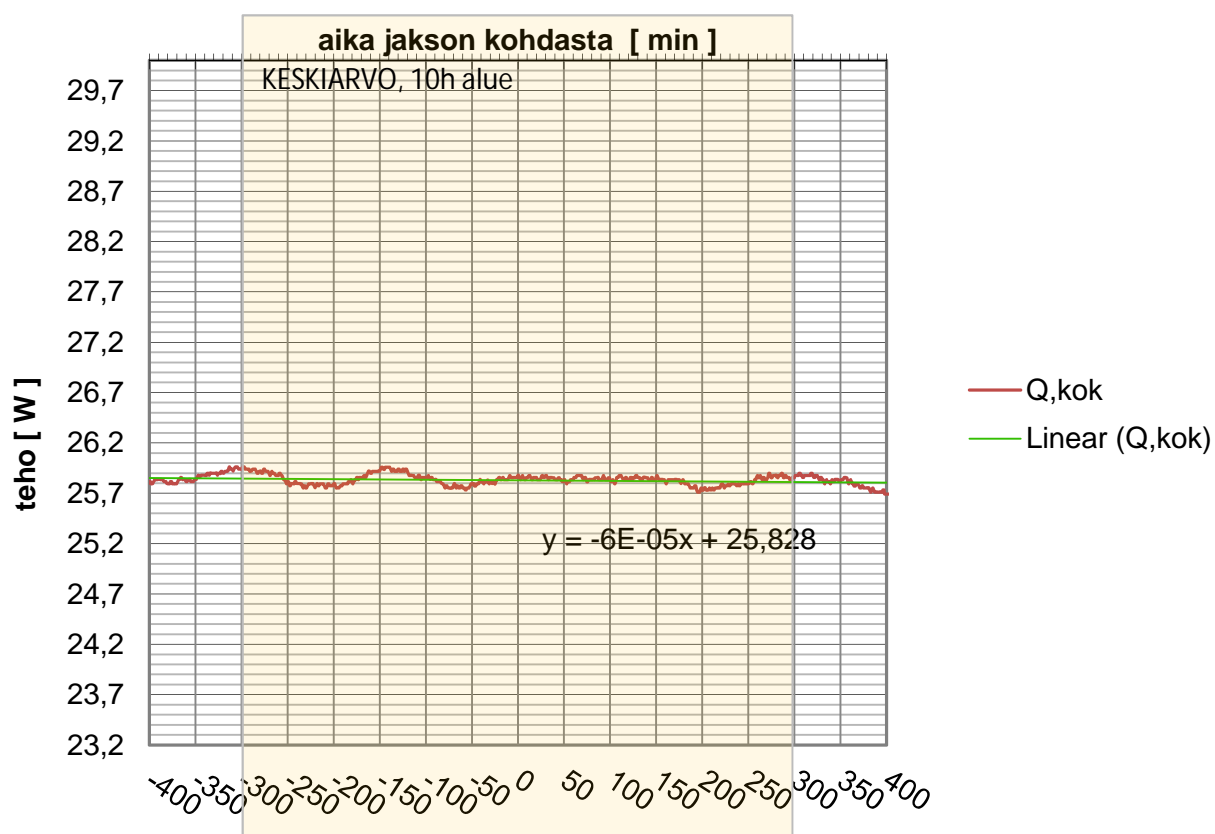
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

5725

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	19,99	19,95	20,06		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,00	19,98	19,95	20,06		20,00	
							-0,36
T,si [°C]	19,42	19,54	19,79	19,80	19,61	19,63	
T,si (KA.) [°C]	19,42	19,54	19,79	19,80	19,61	19,63	
							-34,28
T,se [°C]	-14,42	-14,22	-14,25	-14,33	-14,28	-14,30	
T,se (KA.) [°C]	-14,41	-14,21	-14,23	-14,31	-14,26	-14,28	
							-0,85
T,e [°C]	-15,02	-14,91				-14,97	
T,e (KA.) [°C]	-15,36	-14,92				-15,14	
Q, kok [W]	25,83 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,86	
Q, joht [W]	4,46				Q, joht (KA.) [W]	4,42	

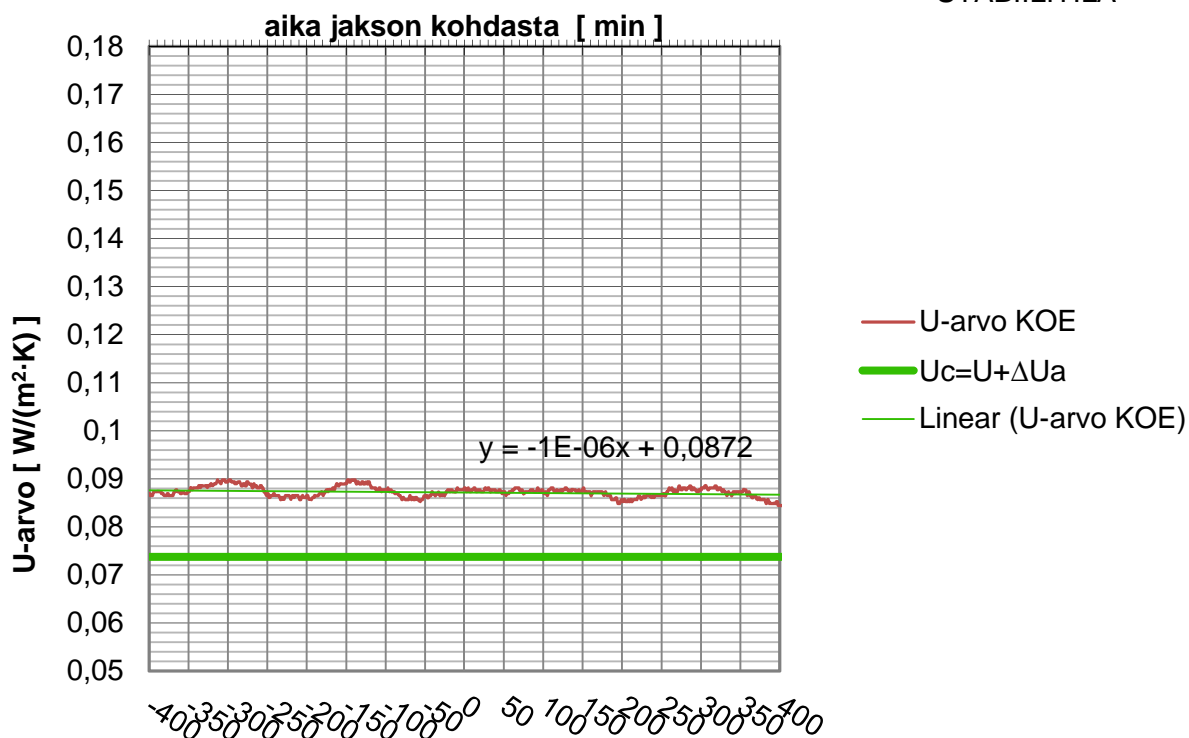
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUU600T

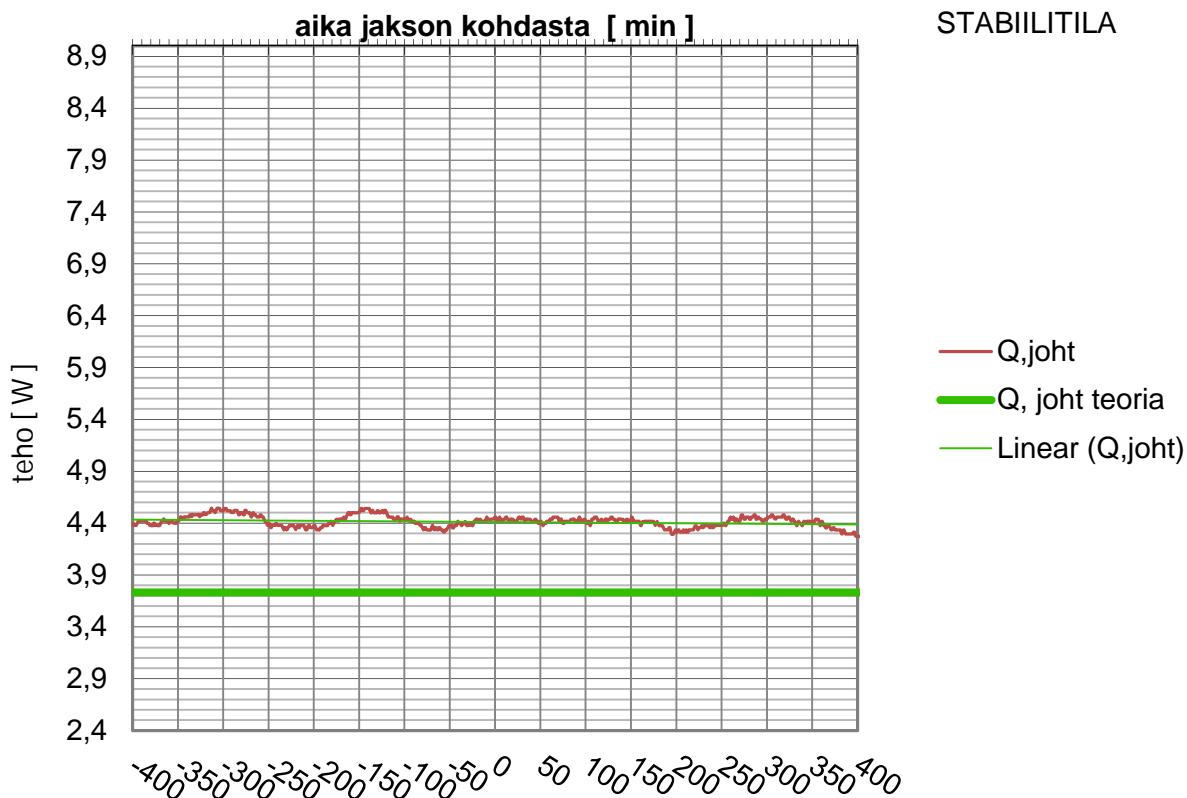
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU600T

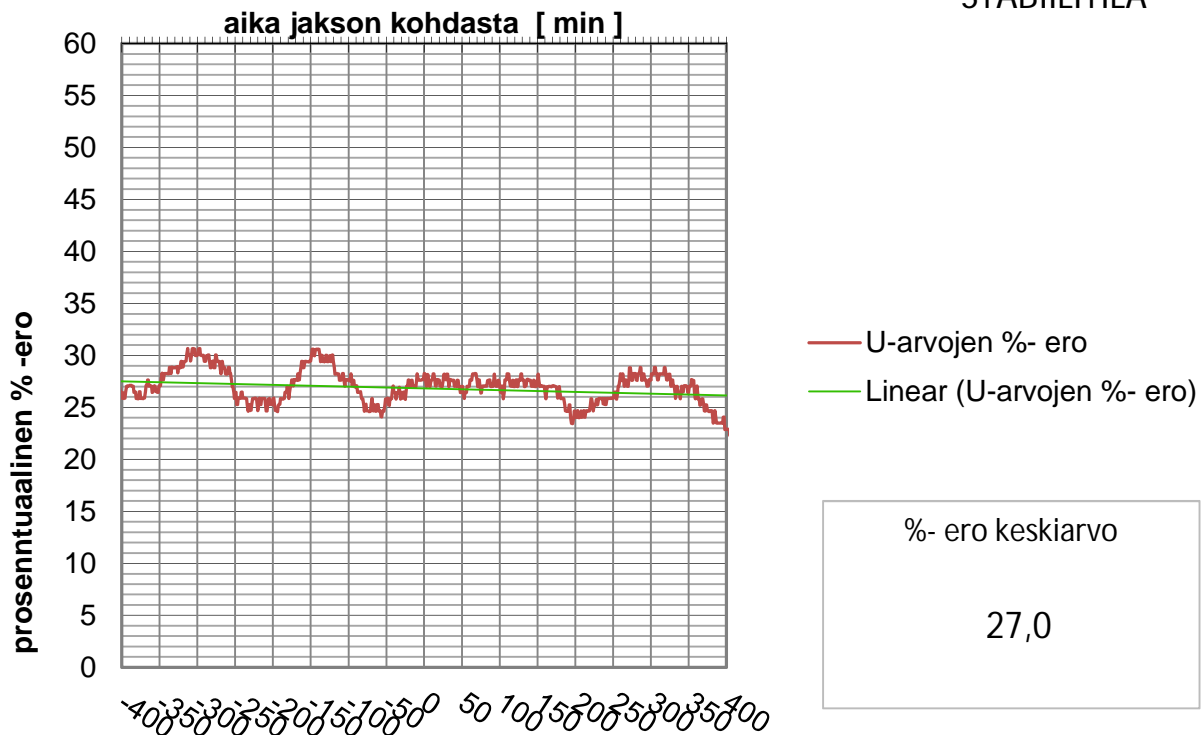
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU600T

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,30

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE
TILANNE
AIKA
JAKSO

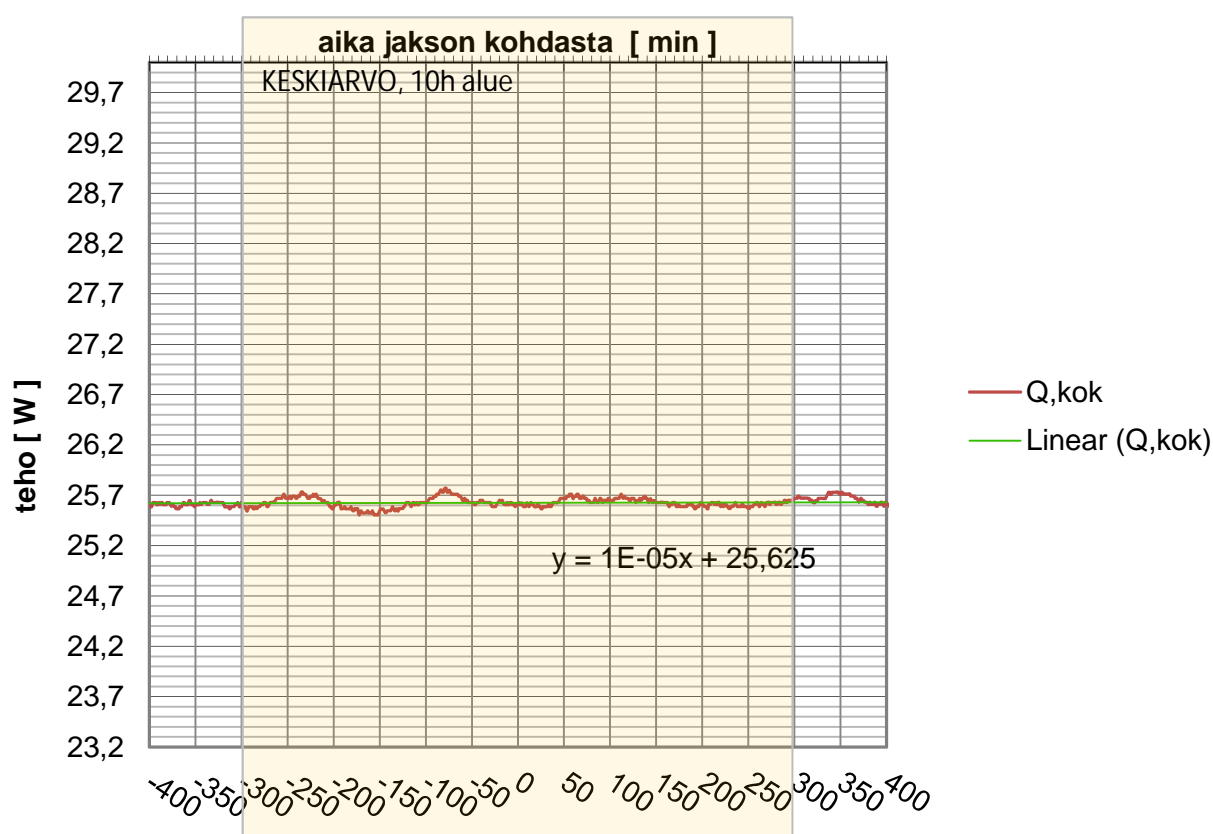
PUU600T
SIVUTUULETIN

13.2.2012 3:19
8000

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS
(keskiarvo +/- 5 tunnin
ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIAARVO	ERO
T _i [°C]	20,01	19,99	19,95	20,07		20,00	
T _i (KA.) [°C]	20,00	19,98	19,94	20,06		20,00	
							-0,37
T _{si} [°C]	19,41	19,53	19,79	19,80	19,61	19,63	
T _{si} (KA.) [°C]	19,41	19,53	19,79	19,80	19,60	19,63	
							-34,45
T _{se} [°C]	-14,56	-14,39	-14,35	-14,52	-14,41	-14,45	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,56	-14,40	-14,36	-14,53	-14,41	-14,45	
							-0,83
T _e [°C]	-15,13	-15,02				-15,08	
T _e (KA.) [°C]	-15,46	-15,09				-15,28	
Q, kok [W]	25,61 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,66	
Q, joht [W]	4,28				Q, joht (KA.) [W]	4,29	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

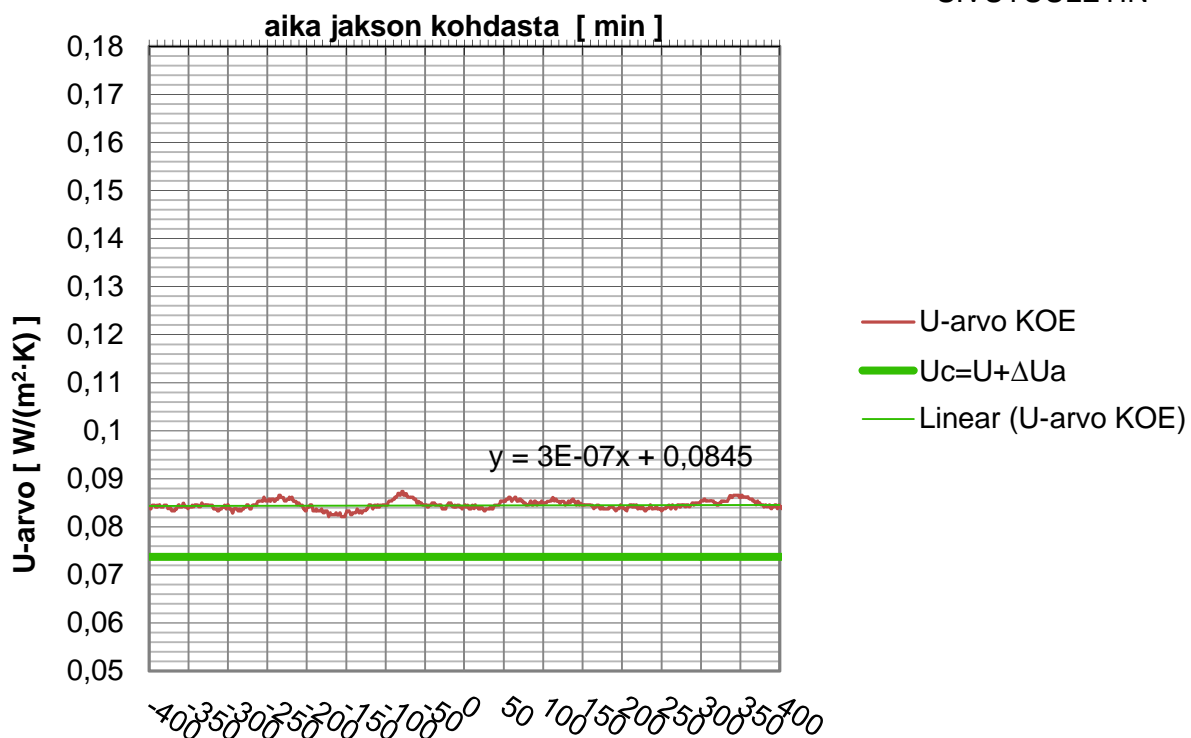


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

PUU600T

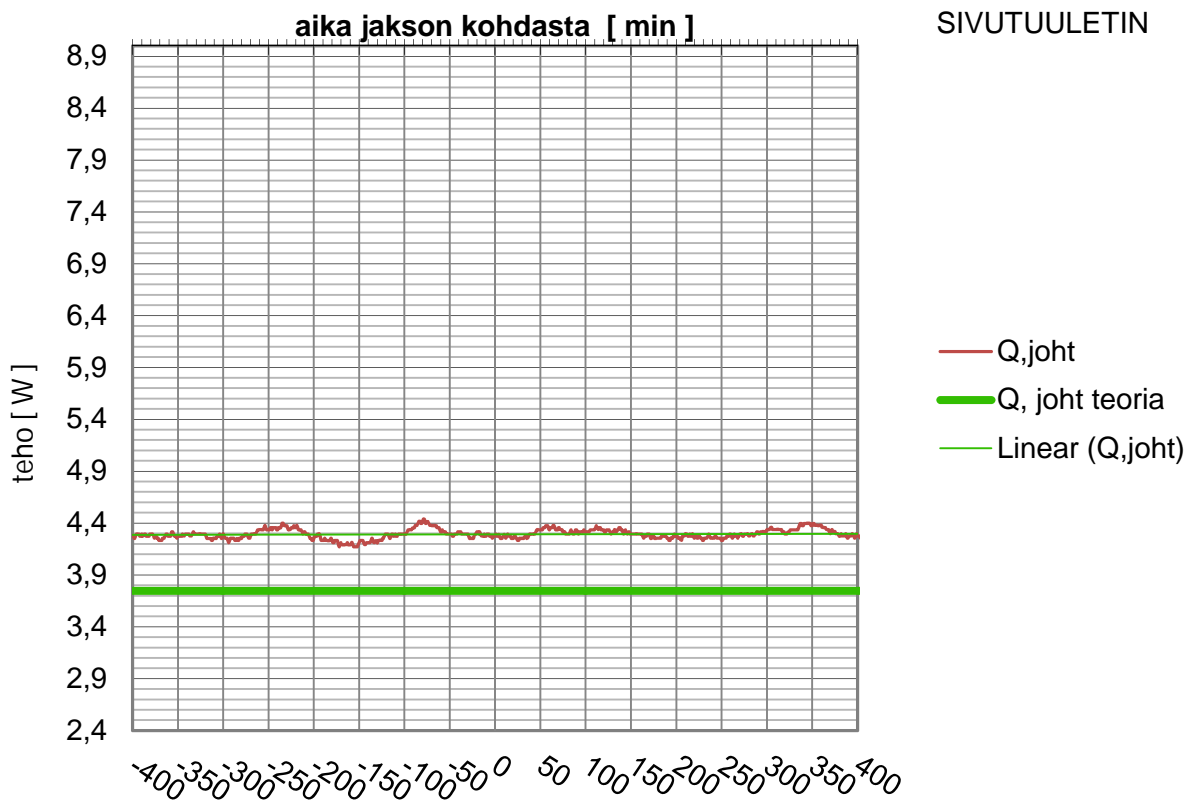
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU600T

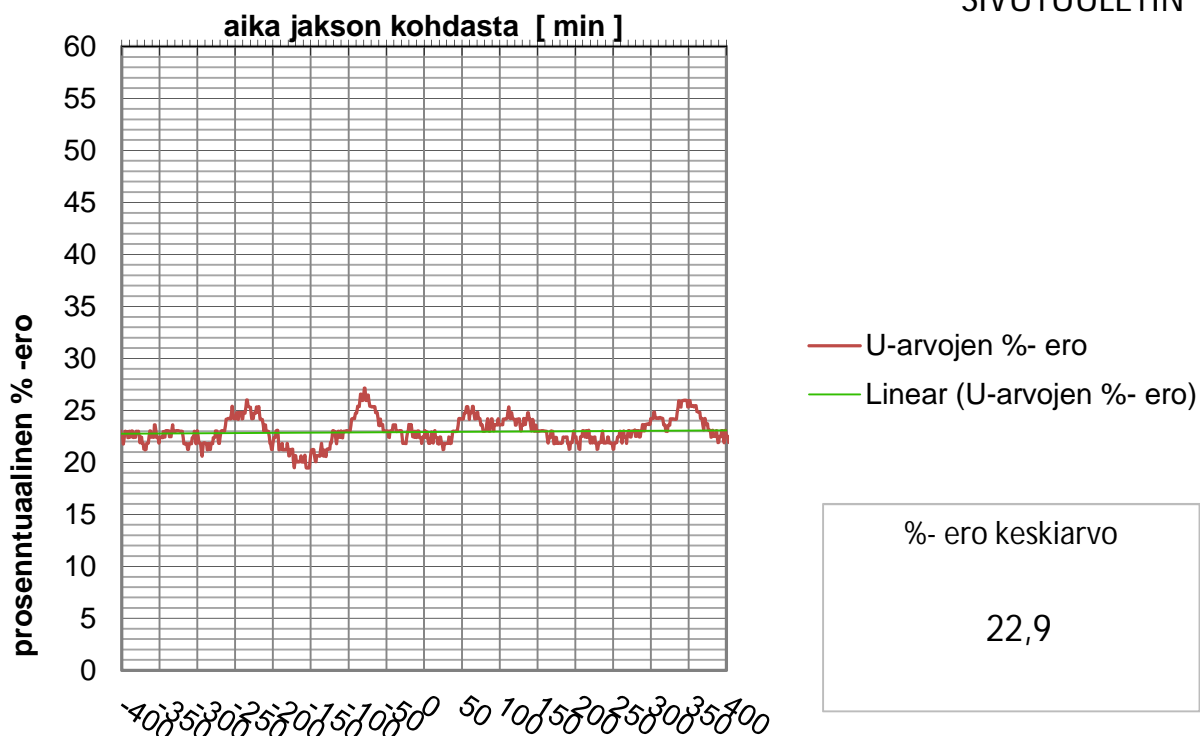
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU600T

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,26

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUU600T

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

AIKA

15.2.2012 22:24

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

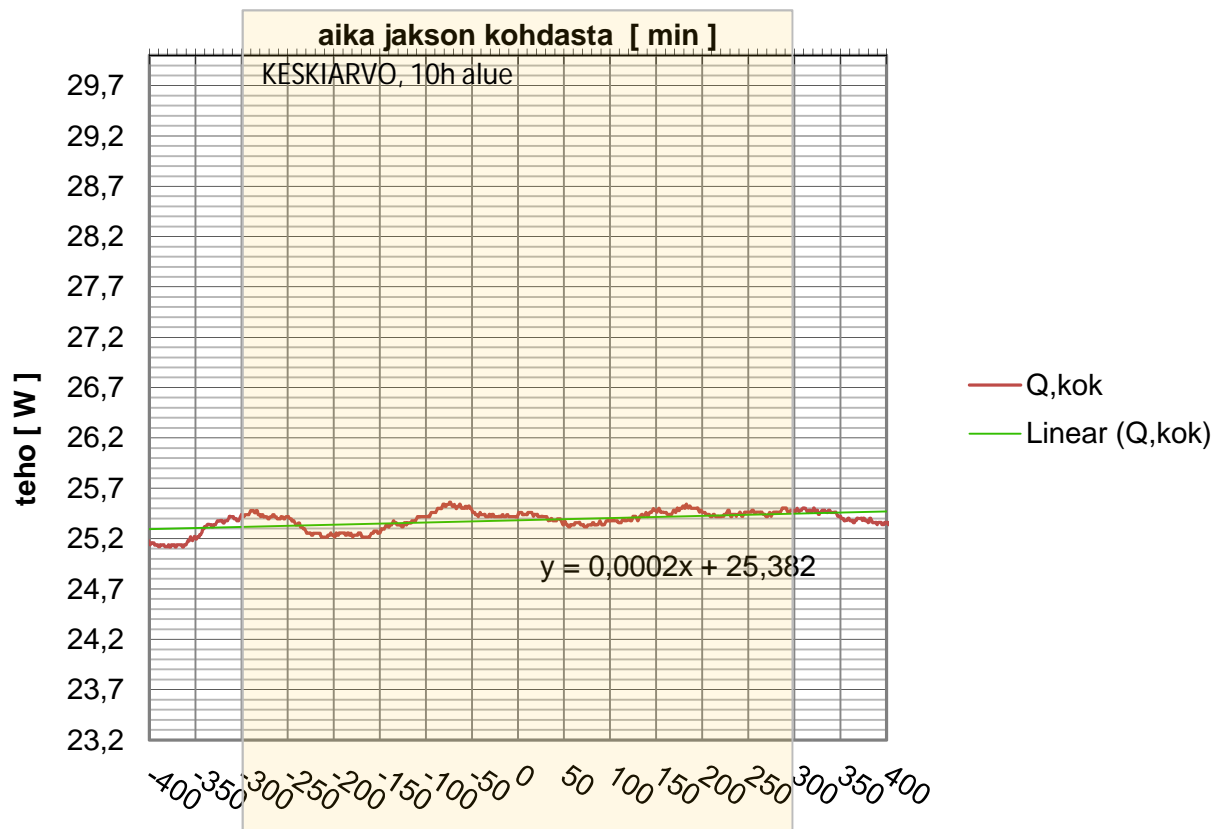
JAKSO

12025

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	20,00	19,99	19,95	20,06		20,00	
T _i (KA.) [°C]	20,01	19,99	19,95	20,07		20,00	
							-0,37
T _{si} [°C]	19,41	19,54	19,80	19,80	19,61	19,63	
T _{si} (KA.) [°C]	19,41	19,54	19,80	19,80	19,61	19,63	
							-34,51
T _{se} [°C]	-14,57	-14,41	-14,39	-14,53	-14,57	-14,50	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,58	-14,42	-14,40	-14,54	-14,58	-14,50	
							-0,80
T _e [°C]	-15,41	-15,16				-15,29	
T _e (KA.) [°C]	-15,41	-15,20				-15,31	
Q, kok [W]	25,46 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,48	
Q, joht [W]	3,99				Q, joht (KA.) [W]	3,95	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

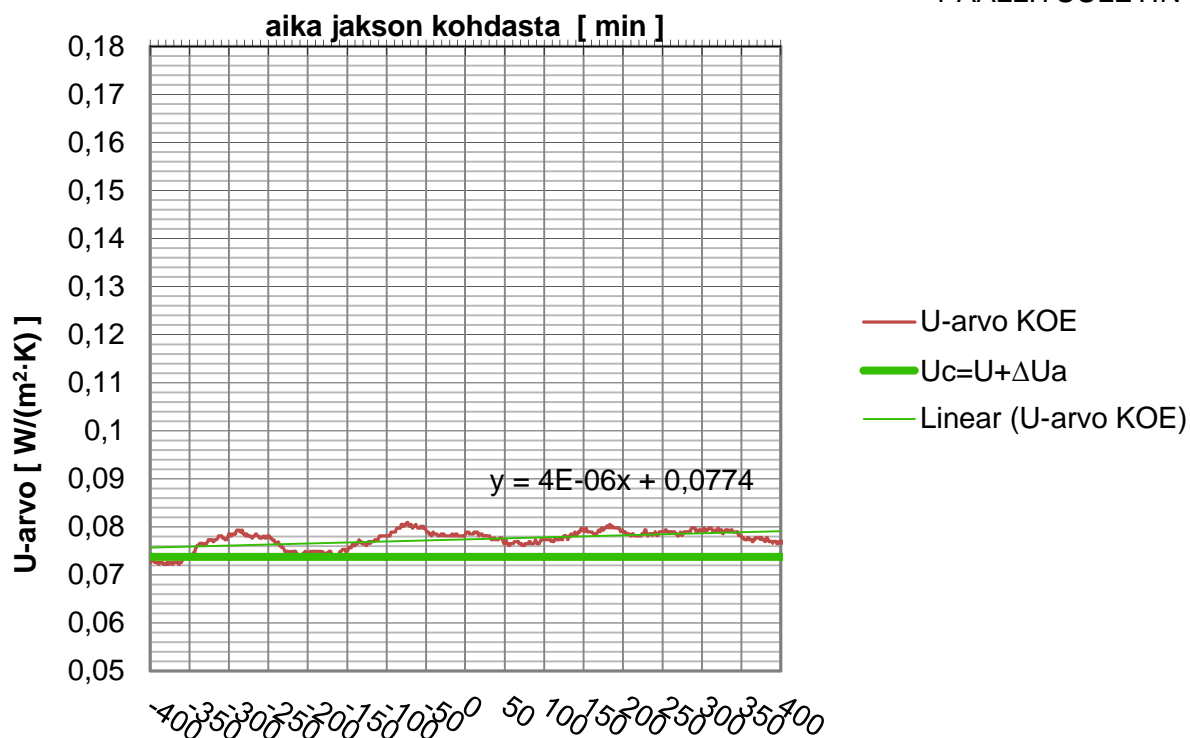


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUU600T

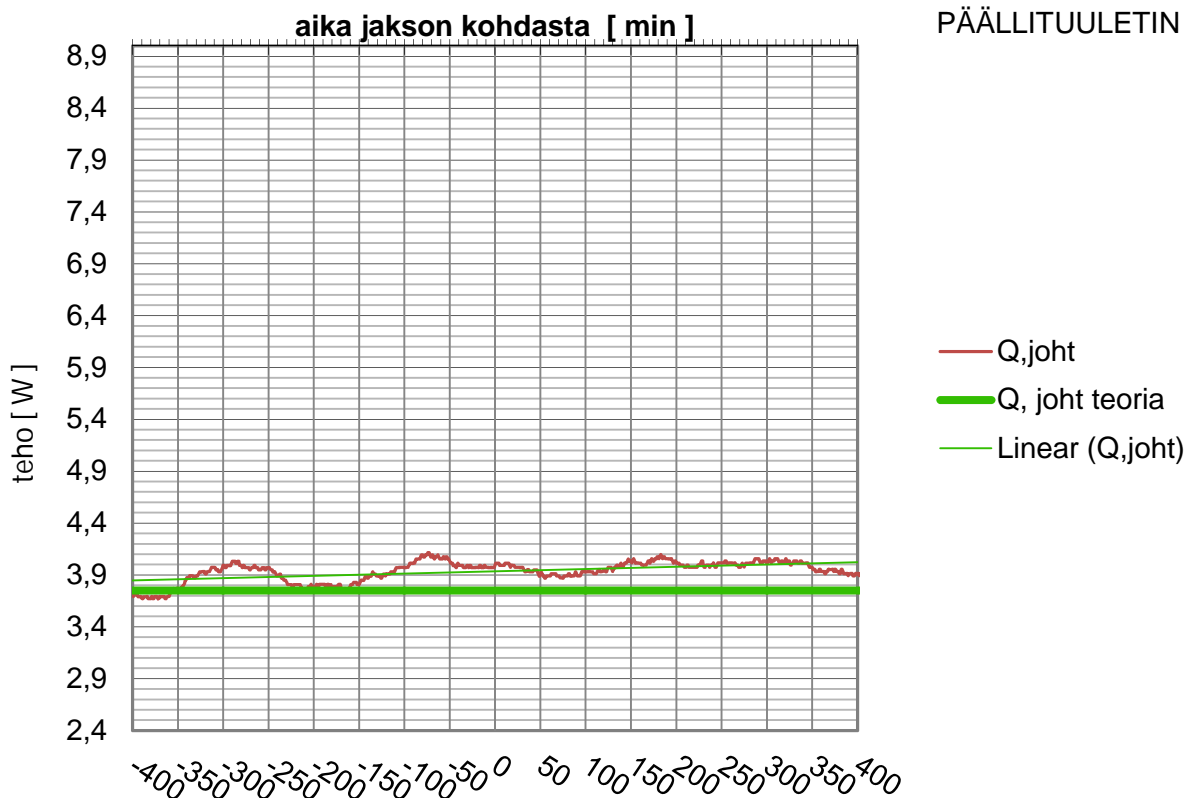
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUU600T

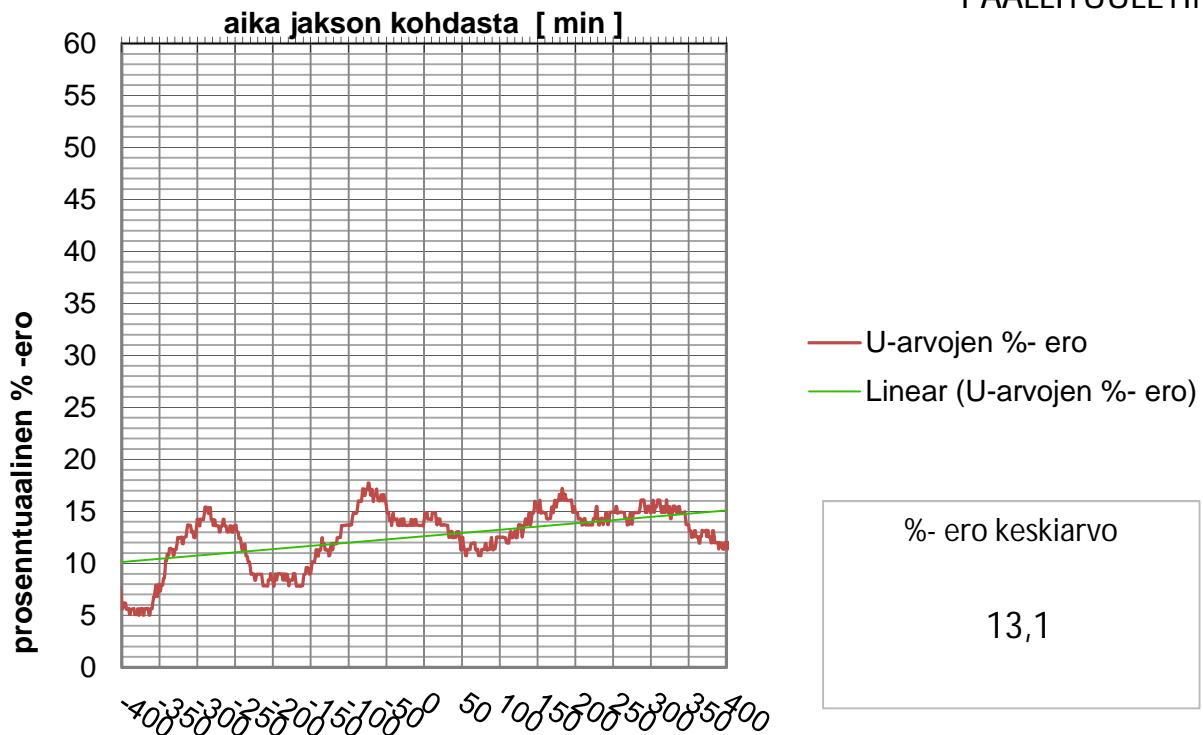
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUU600T

PÄÄLLITUULETIN



Nusselt in luku

1,16

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

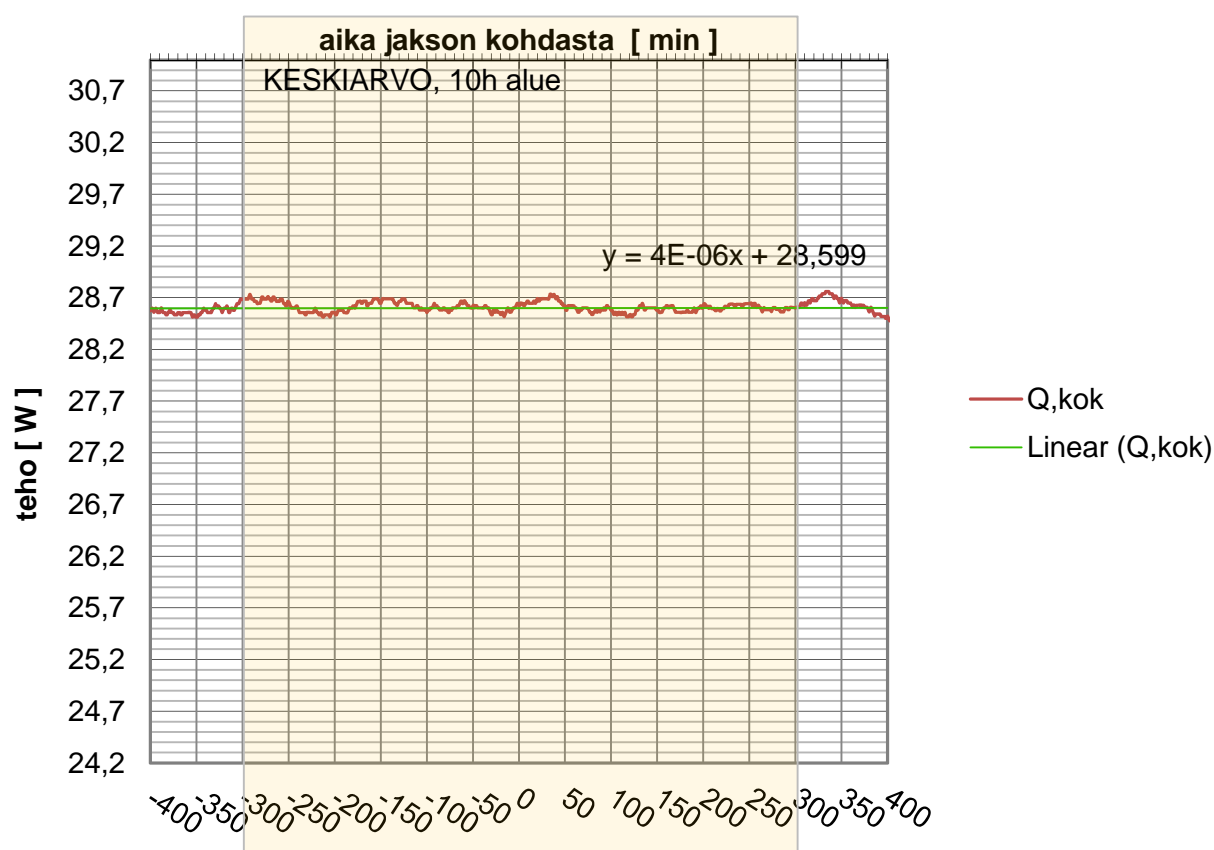
KOE	PUH300
TILANNE	STABIILITILA
AIKA	10.4.2012 2:01
JAKSO	6500

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

(keskiarvo +/- 5 tunnin
ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	19,93	20,00	20,07		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,00	19,93	20,00	20,07		20,00	
							-0,57
T,si [°C]	19,28	19,36	19,34	19,59	19,56	19,43	
T,si (KA.) [°C]	19,28	19,36	19,35	19,59	19,56	19,43	
							-32,99
T,se [°C]	-12,79	-13,08	-13,43	-13,21	-12,29	-12,96	
T,se (KA.) [°C]	-12,83	-13,16	-13,41	-13,24	-12,32	-12,99	
							-1,06
T,e [°C]	-14,36	-13,43	-14,35			-14,05	
T,e (KA.) [°C]	-14,38	-13,41	-14,37			-14,05	
Q, kok [W]	28,65 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	28,61	
Q, joht [W]	7,54				Q, joht (KA.) [W]	7,52	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

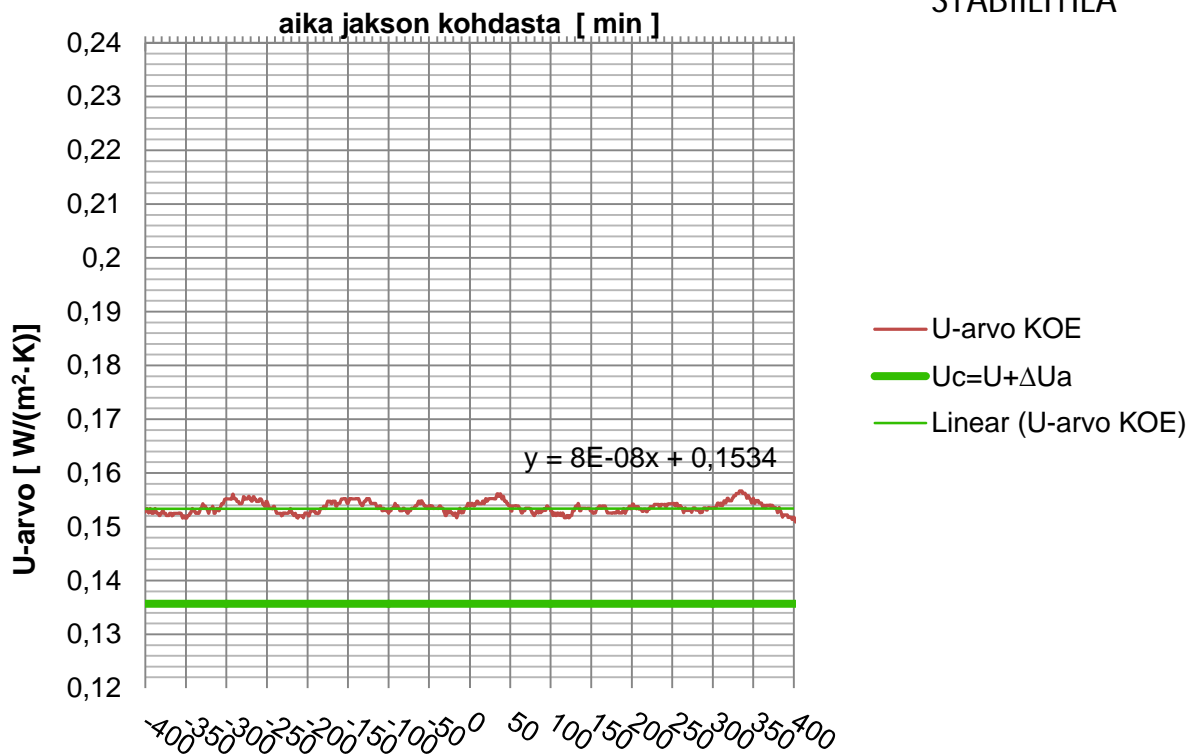


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH300

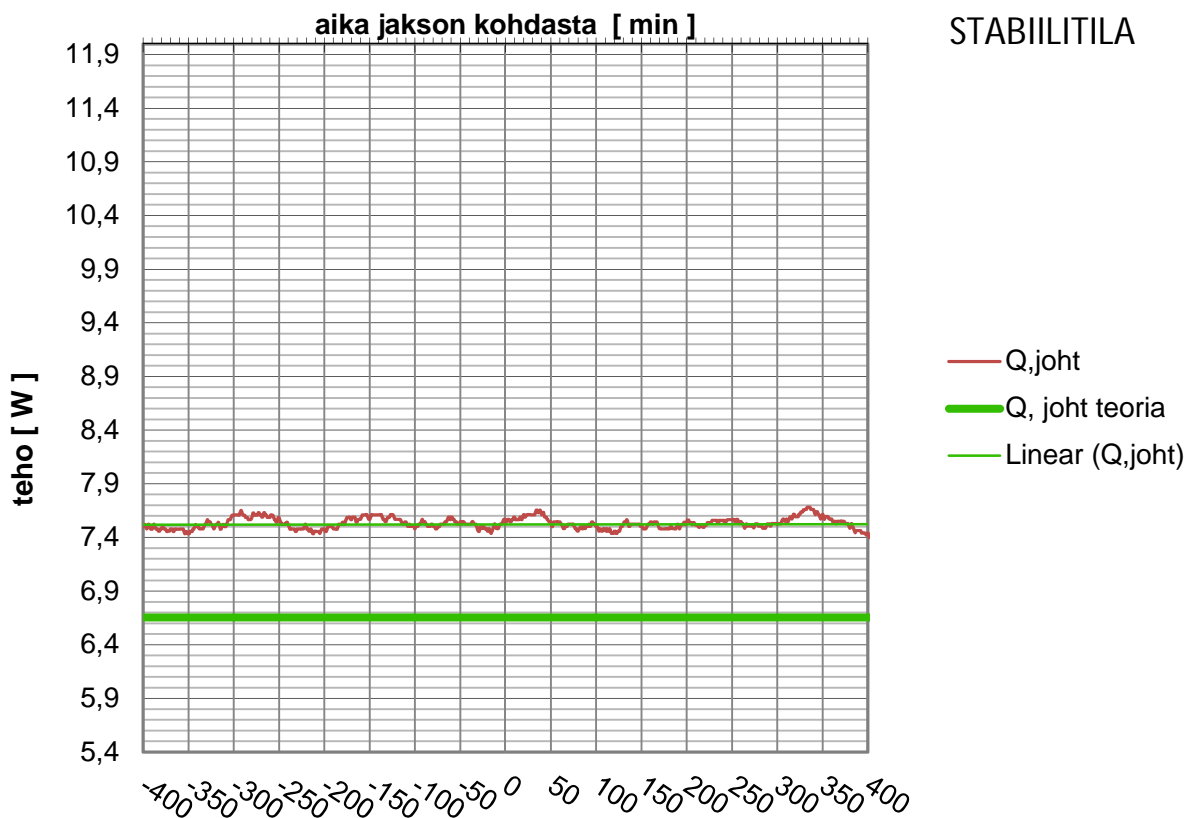
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH300

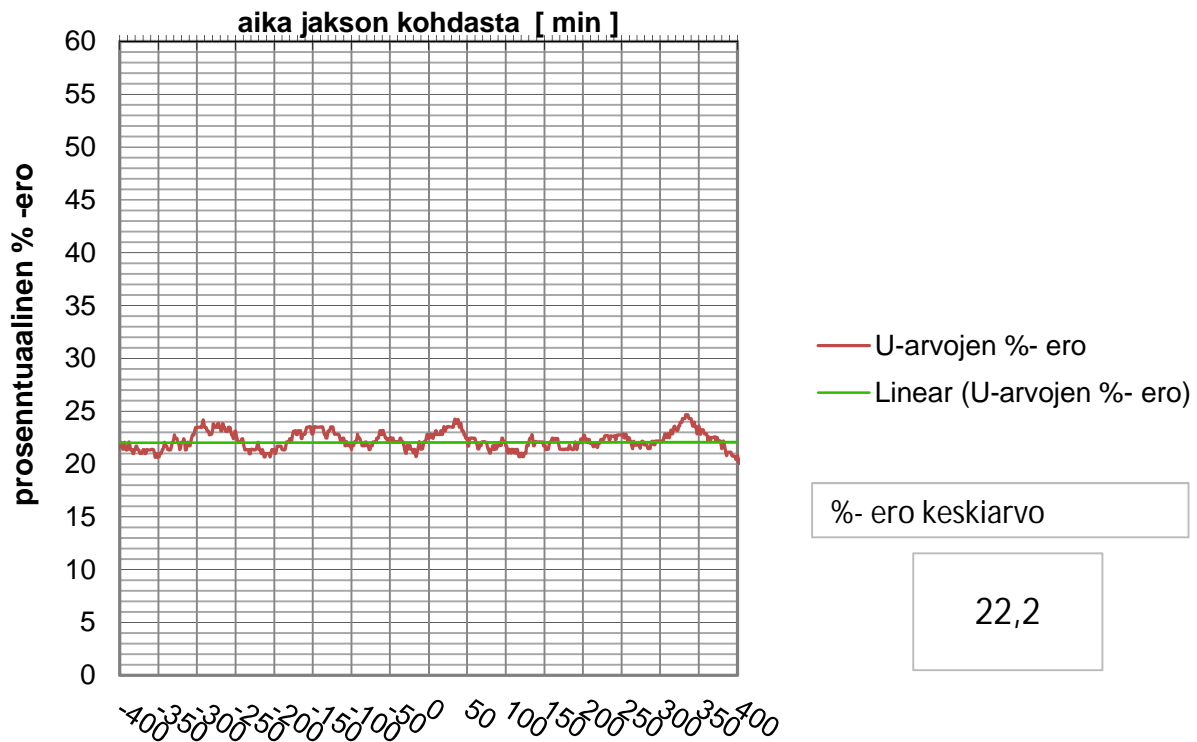
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH300

STABIILITILA



Nusseltin luku

1,26

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

KOE

PUH300

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

12.4.2012 22:21

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

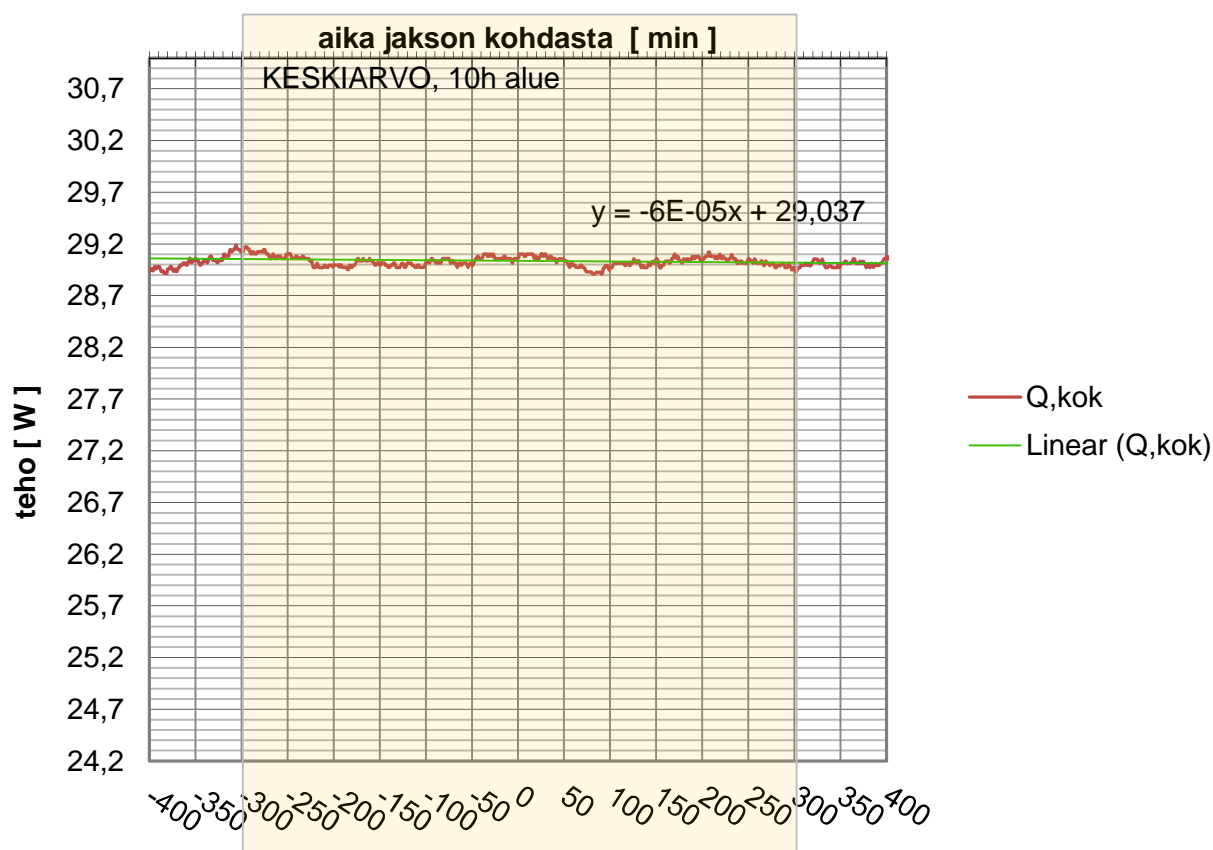
JAKSO

10600

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	20,01	20,02	19,94	20,02		20,00	
T _i (KA.) [°C]	20,02	20,03	19,94	20,02		20,00	
							-0,53
T _{si} [°C]	19,33	19,43	19,76	19,53	19,27	19,46	
T _{si} (KA.) [°C]	19,34	19,43	19,76	19,53	19,27	19,47	
							-33,12
T _{se} [°C]	-12,20	-12,71	-14,13	-13,89	-12,74	-13,14	
T _{se} (KA.) [°C]	-12,20	-12,69	-14,14	-13,89	-12,69	-13,12	
							-1,10
T _e [°C]	-14,18	-14,13	-14,32			-14,21	
T _e (KA.) [°C]	-14,19	-14,14	-14,33			-14,22	
Q, kok [W]	29,10 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	28,95	
Q, joht [W]	7,91				Q, joht (KA.) [W]	7,89	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

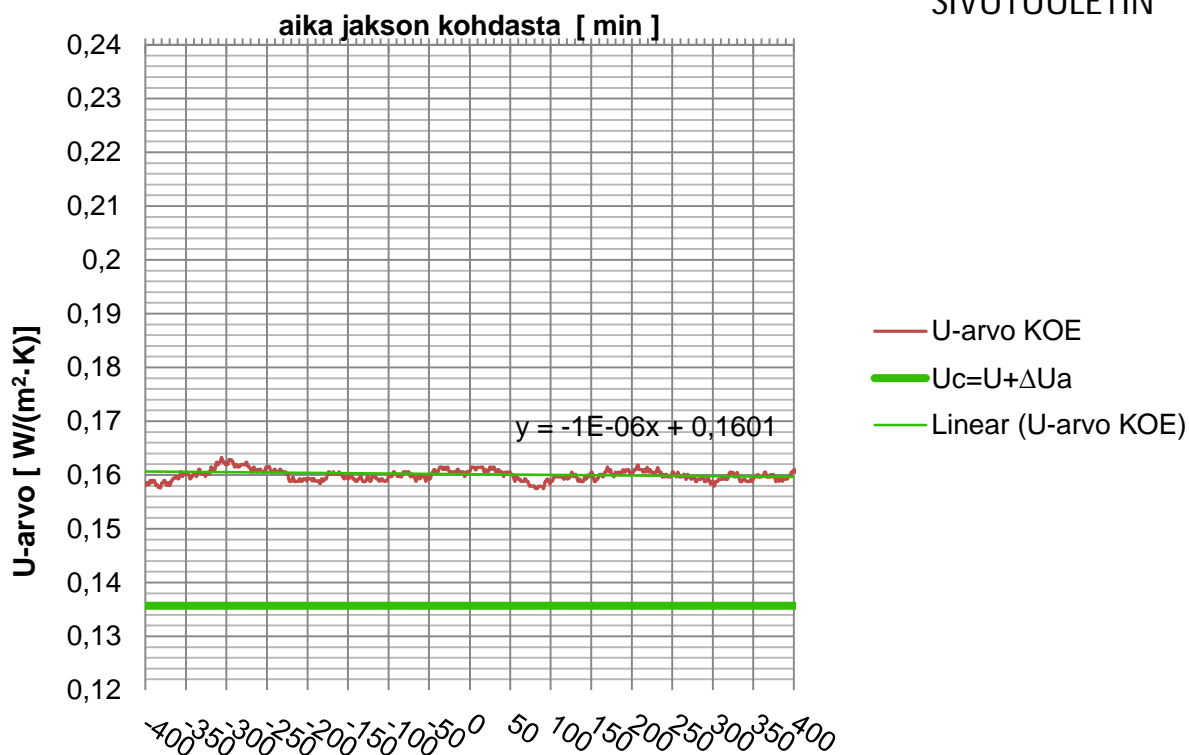


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH300

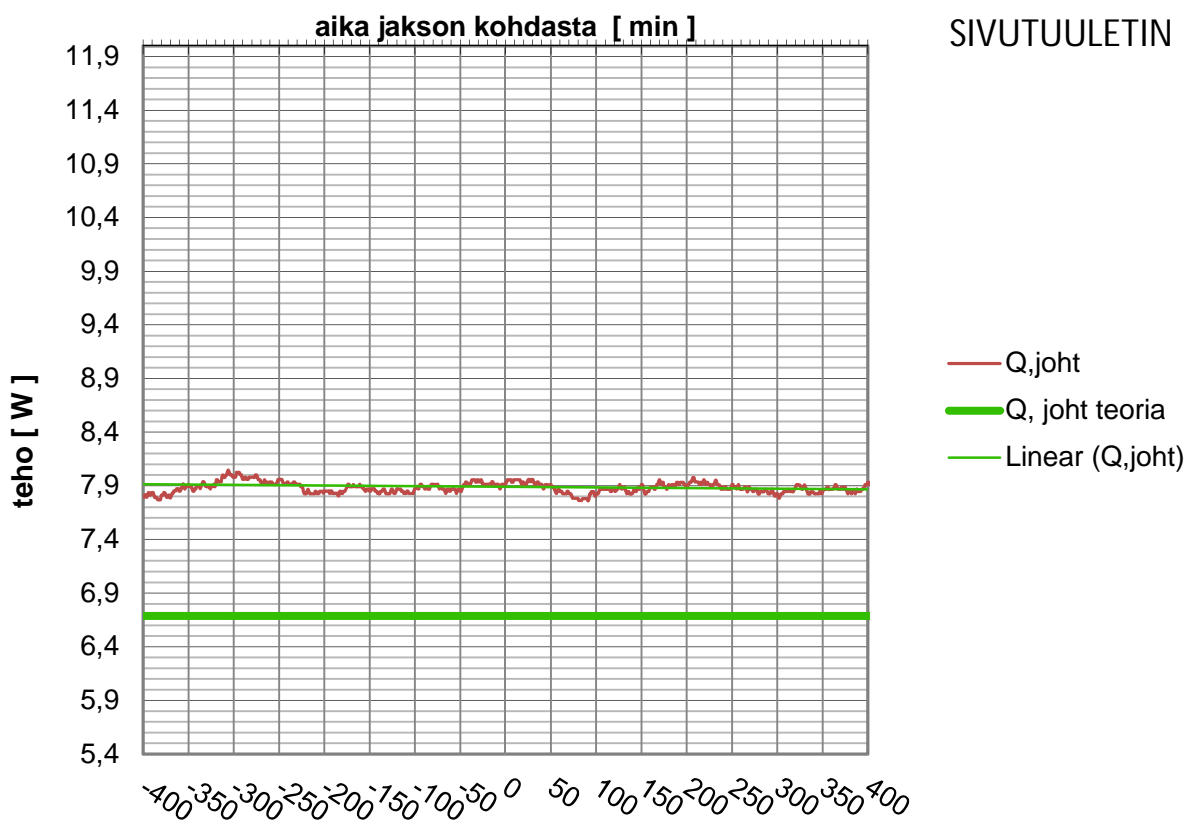
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH300

SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH300

SIVUTUULETIN



Nusseltin luku

1,31

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoituu.

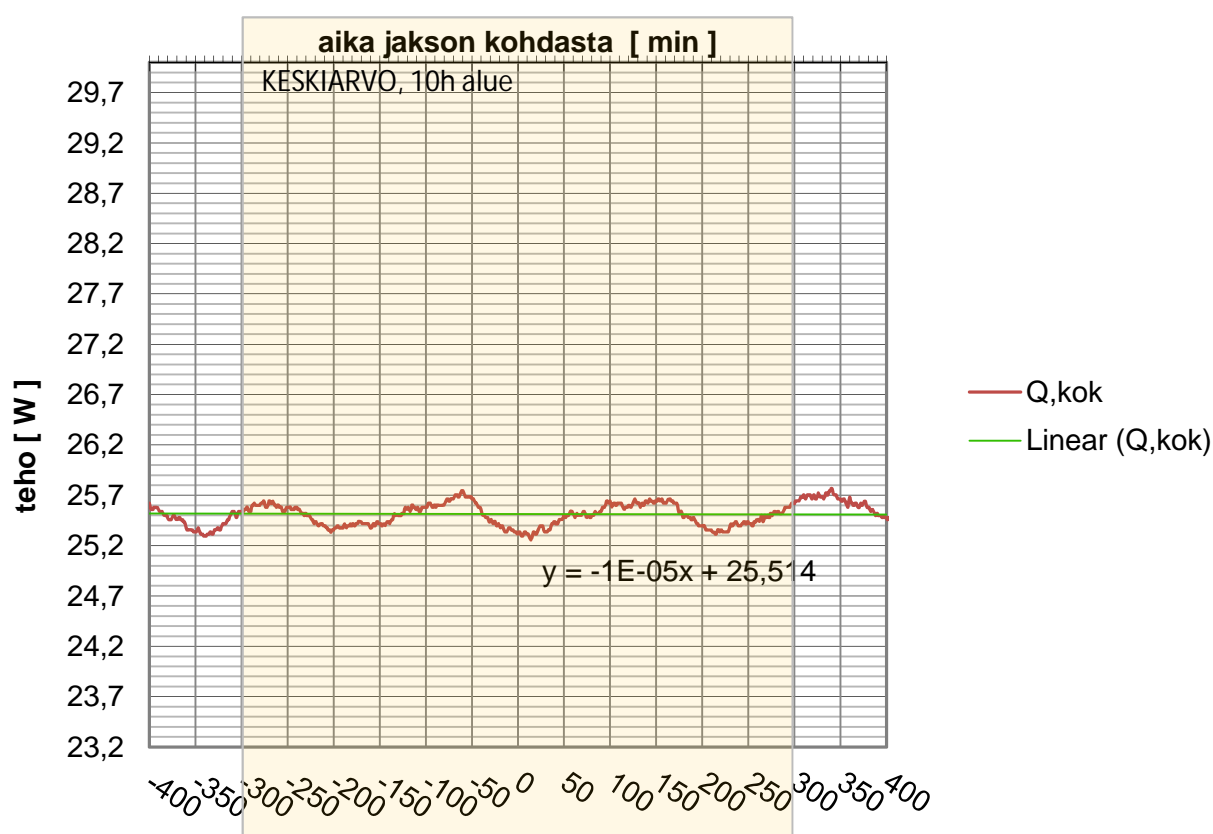
KOE	PUH600
TILANNE	STABIILITILA
AIKA	19.2.2012 21:09
JAKSO	4675

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

(keskiarvo +/- 5 tunnin
ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,01	20,01	19,93	20,06		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,00	20,00	19,92	20,06		19,99	
							-0,42
T,si [°C]	19,38	19,34	19,86	19,77	19,58	19,58	
T,si (KA.) [°C]	19,37	19,33	19,85	19,76	19,57	19,58	
							-34,20
T,se [°C]	-14,31	-14,51	-14,01	-14,44	-13,75	-14,20	
T,se (KA.) [°C]	-14,32	-14,49	-14,02	-14,44	-13,75	-14,20	
							-0,49
T,e [°C]	-14,87	-14,49				-14,68	
T,e (KA.) [°C]	-14,89	-14,50				-14,70	
Q, kok [W]	25,31 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,63	
Q, joht [W]	3,92				Q, joht (KA.) [W]	4,11	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

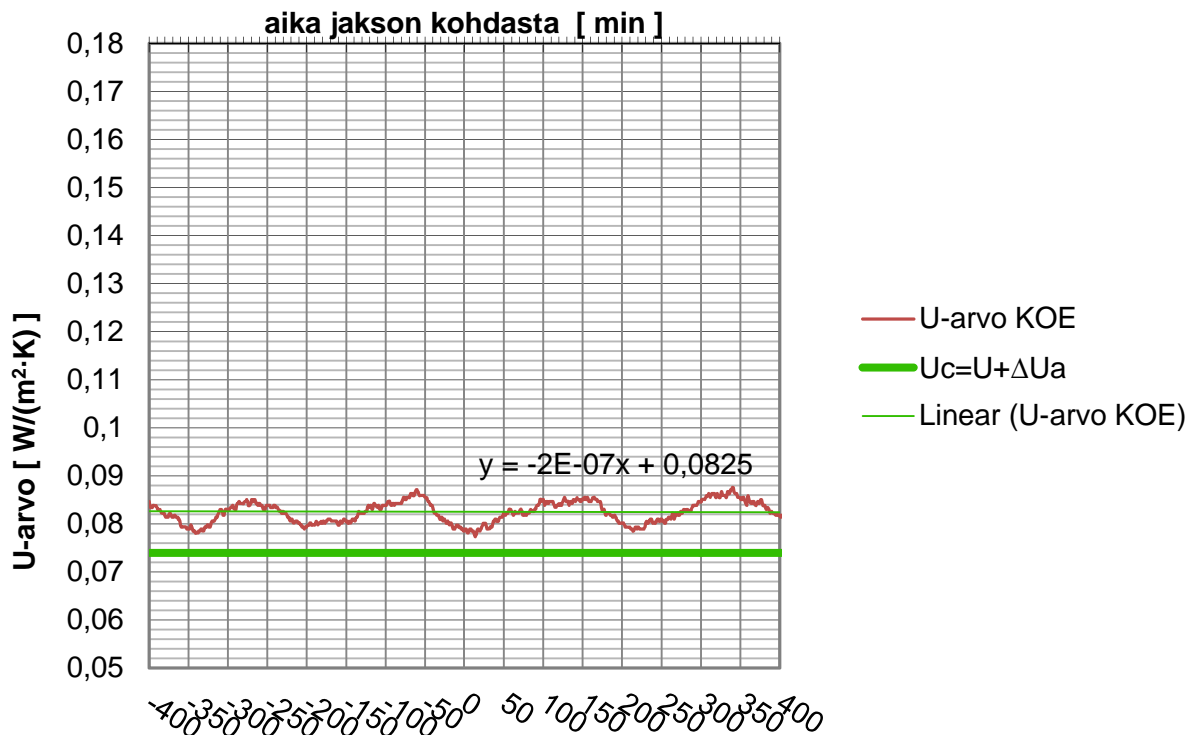


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH600

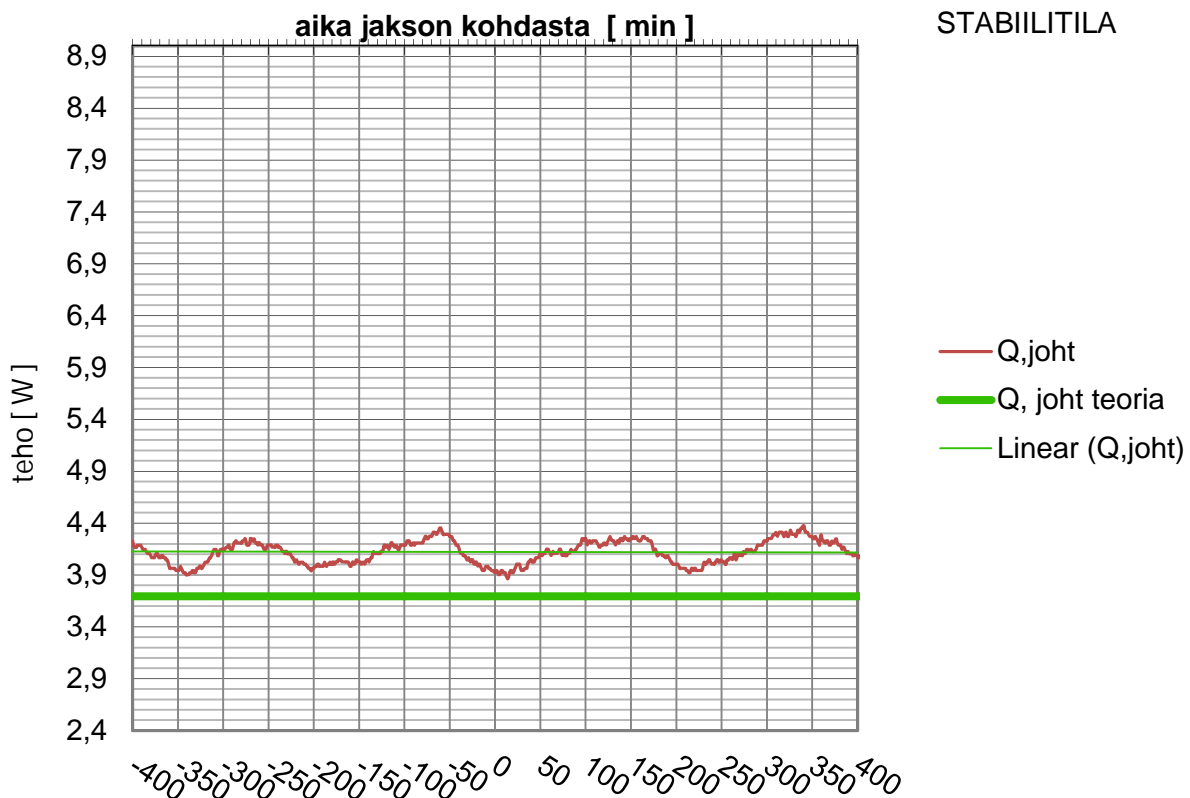
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH600

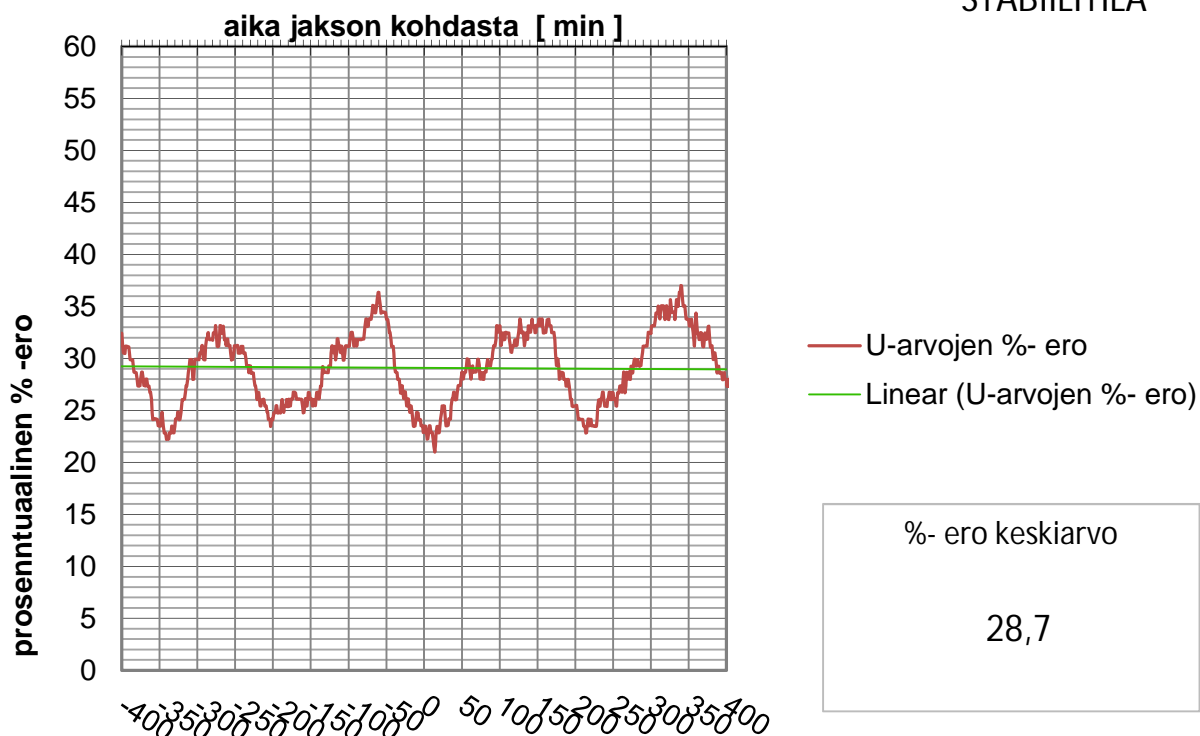
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,31

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUH600

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

24.2.2012 3:14

JAKSO

10800

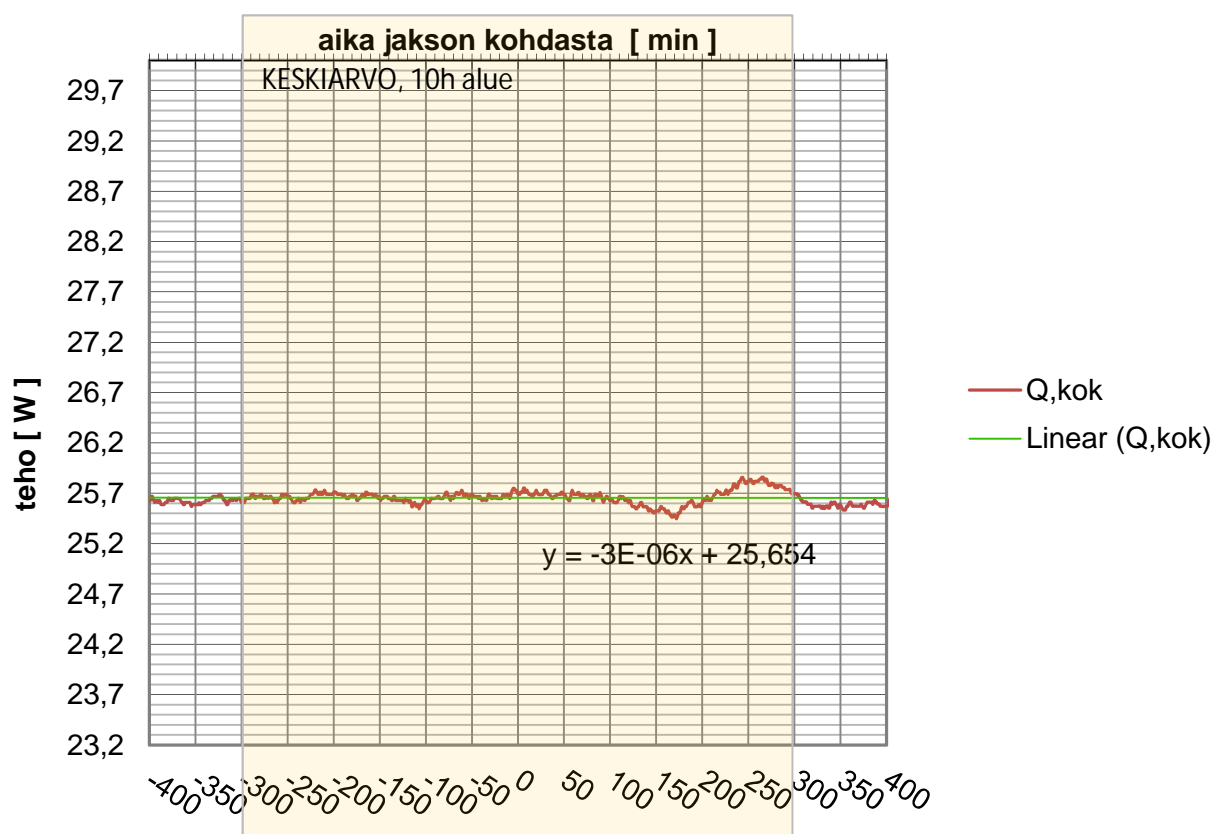
ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIAARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	20,03	19,91	20,05		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,01	20,04	19,91	20,06		20,00	
							-0,43
T,si [°C]	19,37	19,30	19,94	19,76	19,48	19,57	
T,si (KA.) [°C]	19,37	19,30	19,94	19,76	19,48	19,57	
							-34,13
T,se [°C]	-14,21	-14,66	-14,12	-14,31	-13,43	-14,15	
T,se (KA.) [°C]	-14,20	-14,64	-14,10	-14,31	-13,38	-14,13	
							-0,56
T,e [°C]	-14,85	-14,59				-14,72	
T,e (KA.) [°C]	-14,82	-14,55				-14,69	
Q, kok [W]	25,71 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,69	
Q, joht [W]	4,38				Q, joht (KA.) [W]	4,36	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

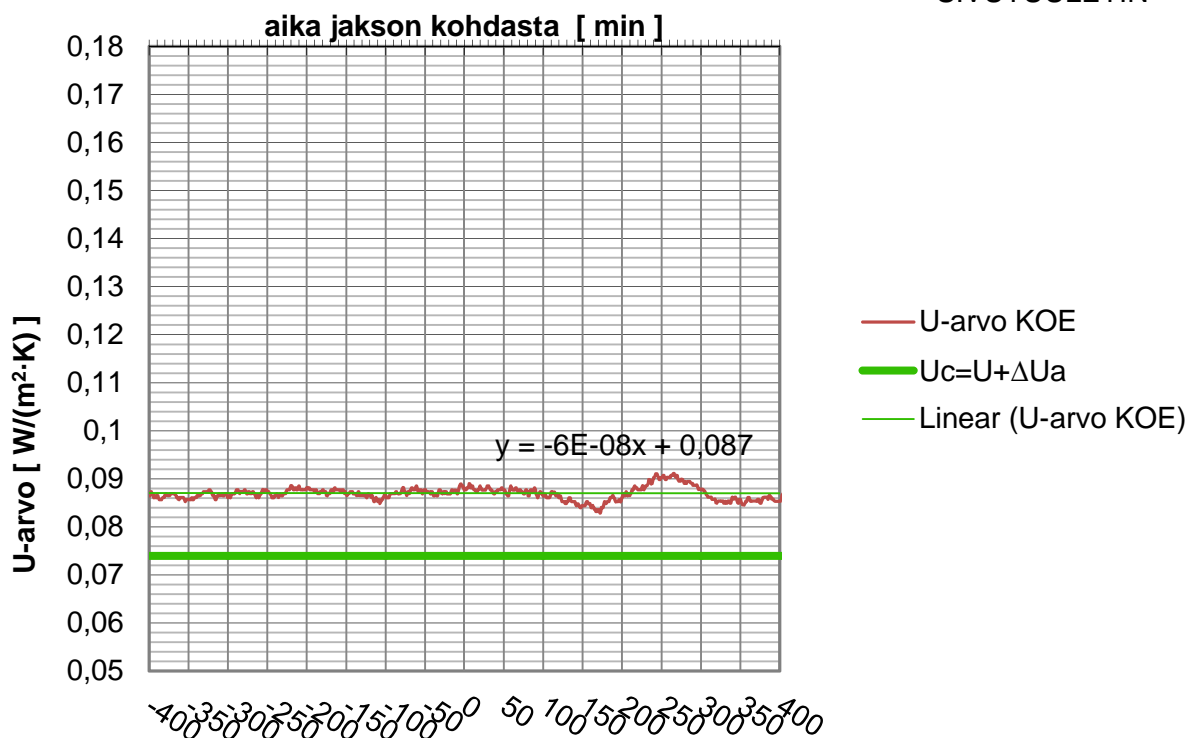


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH600

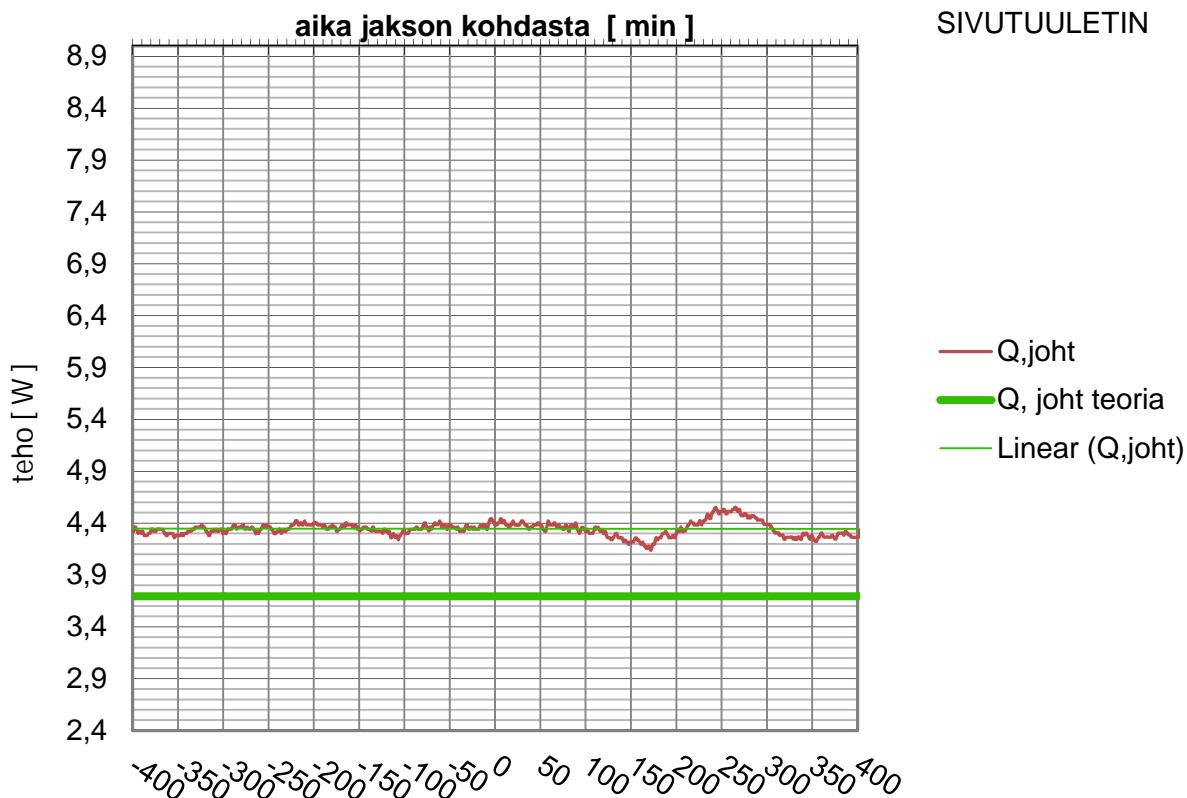
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH600

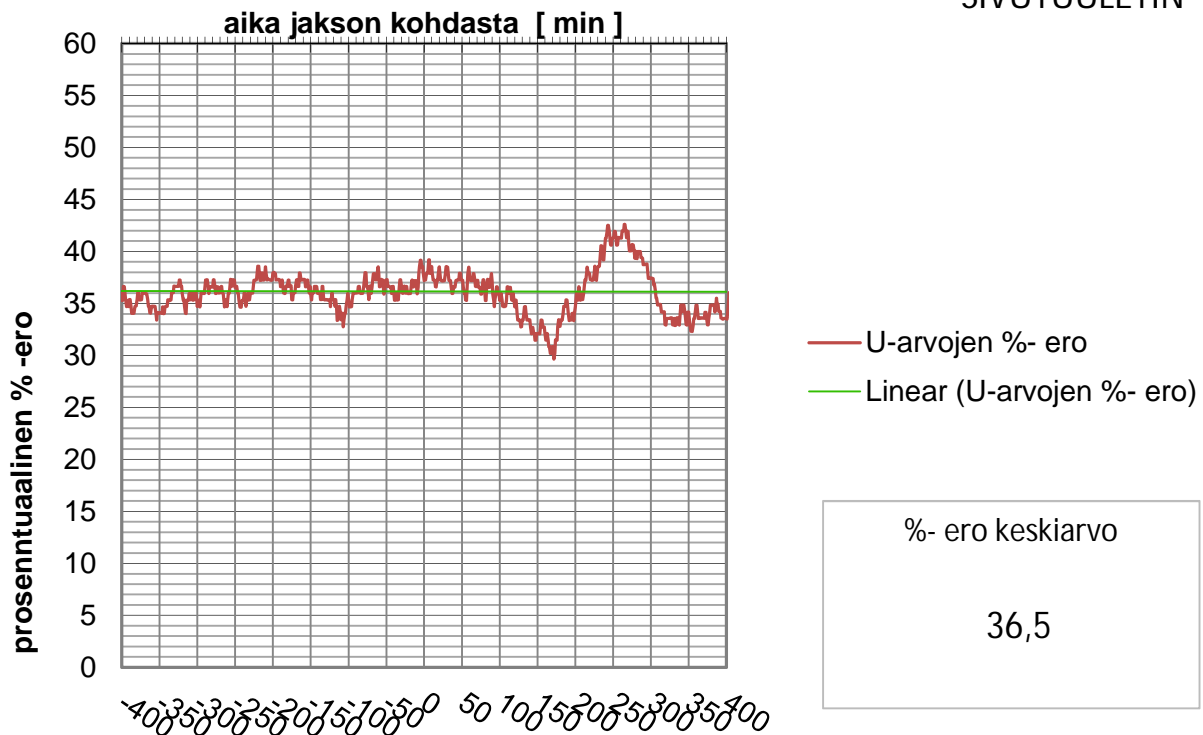
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600

SIVUTUULETIN



Nusseltin luku

1,39

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUH600

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

AIKA

27.2.2012 3:44

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

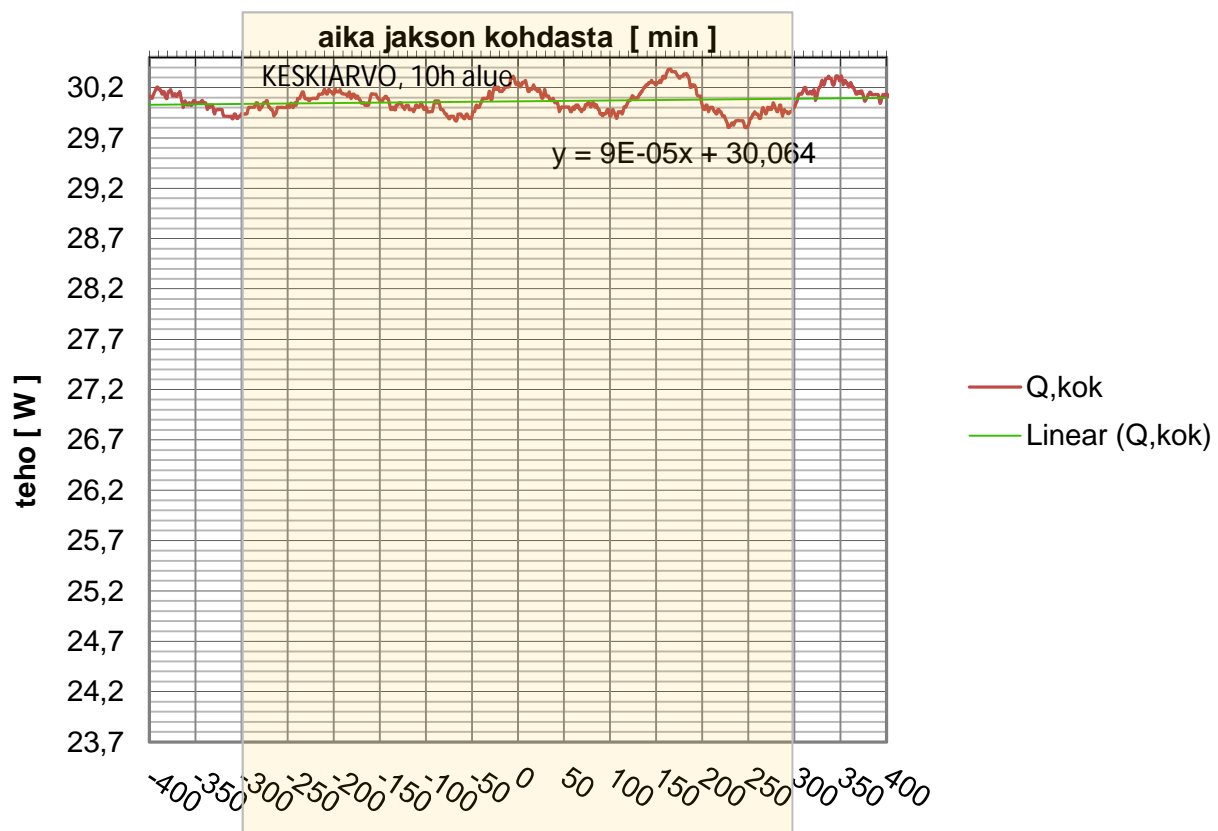
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

15150

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	19,92	19,66	20,31	20,09		19,99	
T _i (KA.) [°C]	19,91	19,65	20,31	20,09		19,99	
							-1,12
T _{si} [°C]	19,15	19,05	17,29	18,86	19,99	18,87	
T _{si} (KA.) [°C]	19,15	19,05	17,28	18,86	19,99	18,87	
							-34,68
T _{se} [°C]	-14,77	-14,57	-14,59	-14,74	-14,72	-14,68	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,79	-14,60	-14,61	-14,75	-14,73	-14,70	
							-0,17
T _e [°C]	-14,85	-14,88				-14,86	
T _e (KA.) [°C]	-14,86	-14,88				-14,87	
Q, kok [W]	30,21 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	30,01	
Q, joht [W]	8,83				Q, joht (KA.) [W]	8,64	

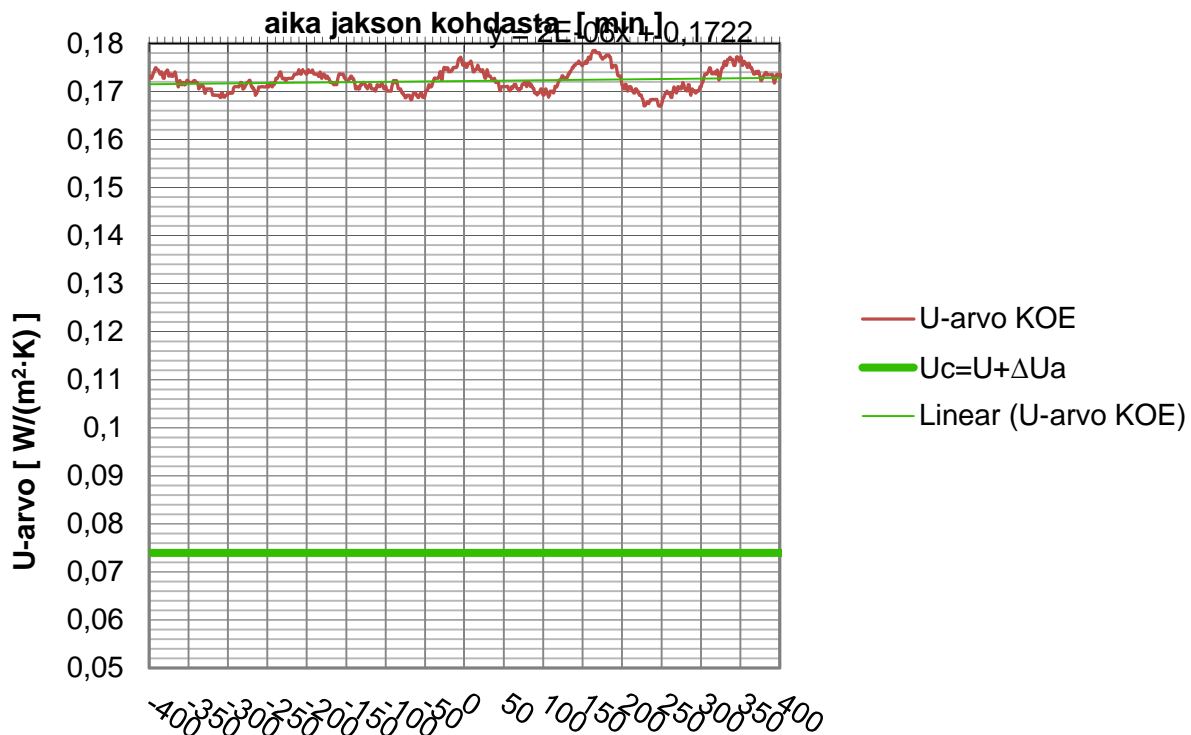
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH600

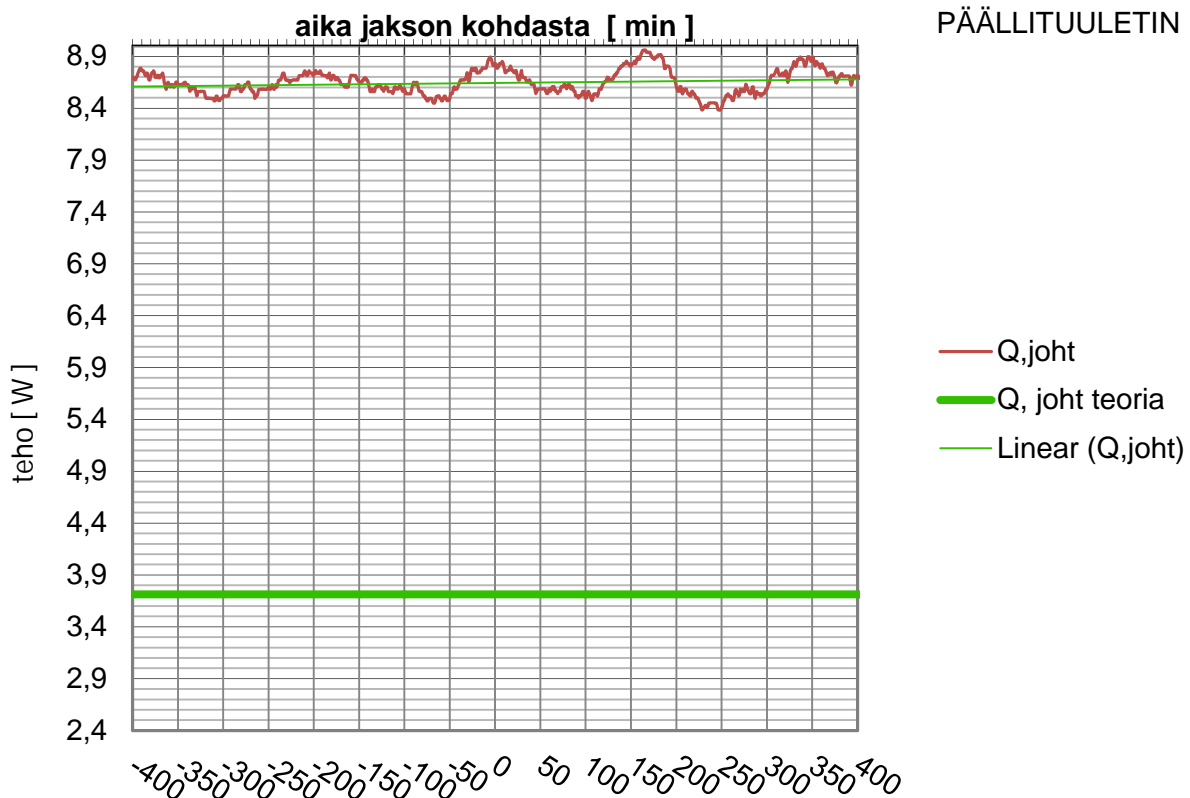
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH600

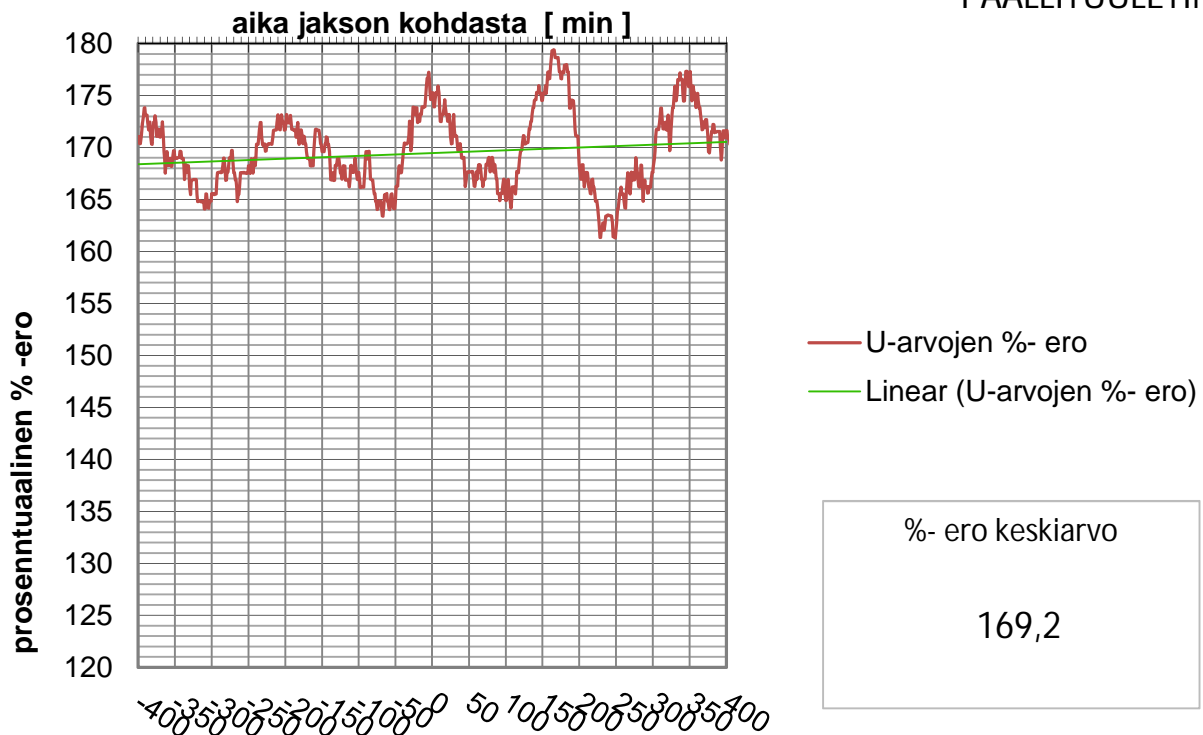
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600

PÄÄLLITUULETIN



Nusseltin luku

2,77

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUH600_2

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

15.4.2012 15:59

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

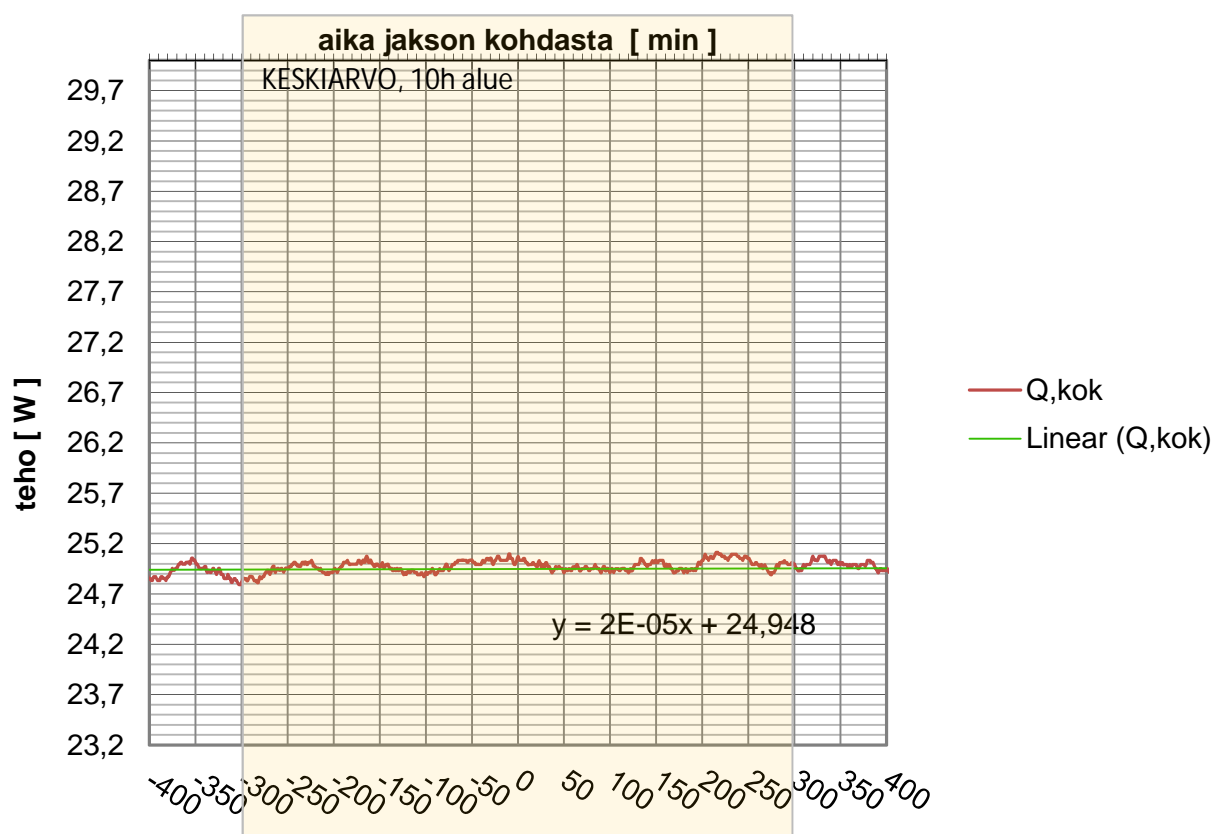
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

3000

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIVARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,02	19,92	20,08		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	20,02	19,92	20,08		20,00	
							-0,39
T _{si} [°C]	19,41	19,49	19,83	19,76	19,59	19,62	
T _{si} (KA.) [°C]	19,41	19,49	19,84	19,76	19,59	19,62	
							-34,23
T _{se} [°C]	-14,48	-14,51	-14,08	-14,07	-14,01	-14,23	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,47	-14,50	-14,07	-14,07	-14,02	-14,22	
							-0,45
T _e [°C]	-14,77	-14,57				-14,67	
T _e (KA.) [°C]	-14,77	-14,58				-14,67	
Q, kok [W]	25,03 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,98	
Q, joht [W]	3,65				Q, joht (KA.) [W]	3,56	

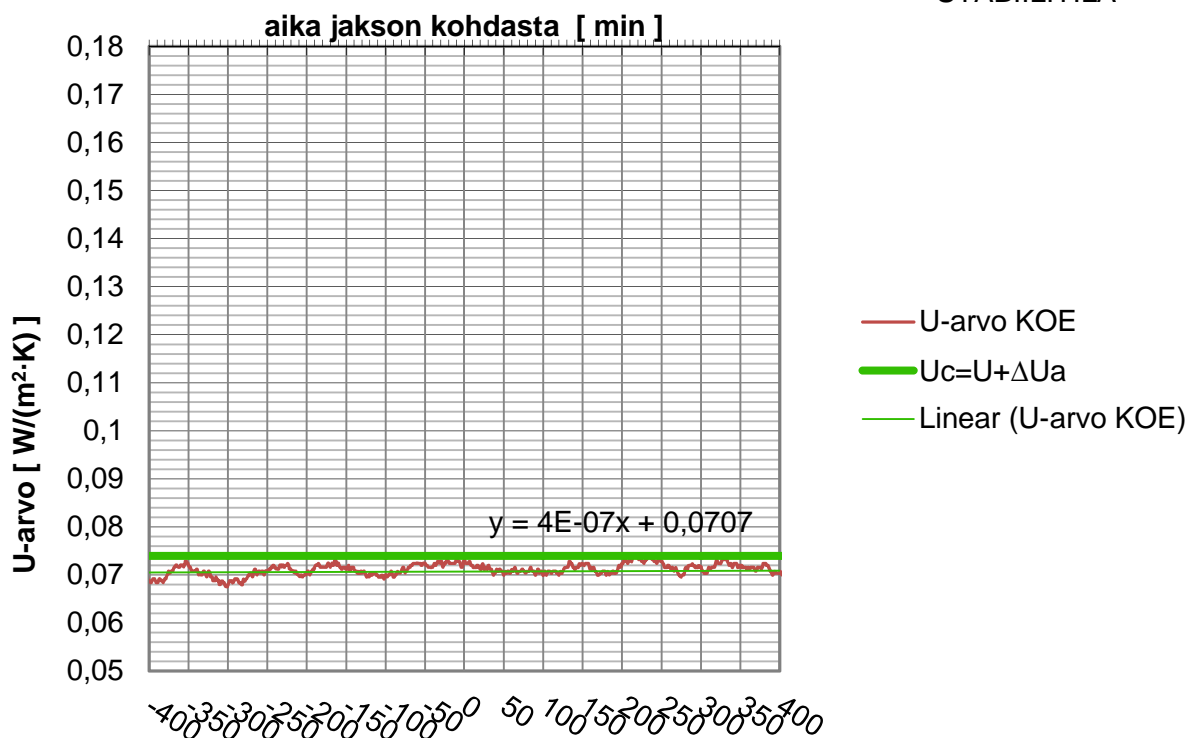
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

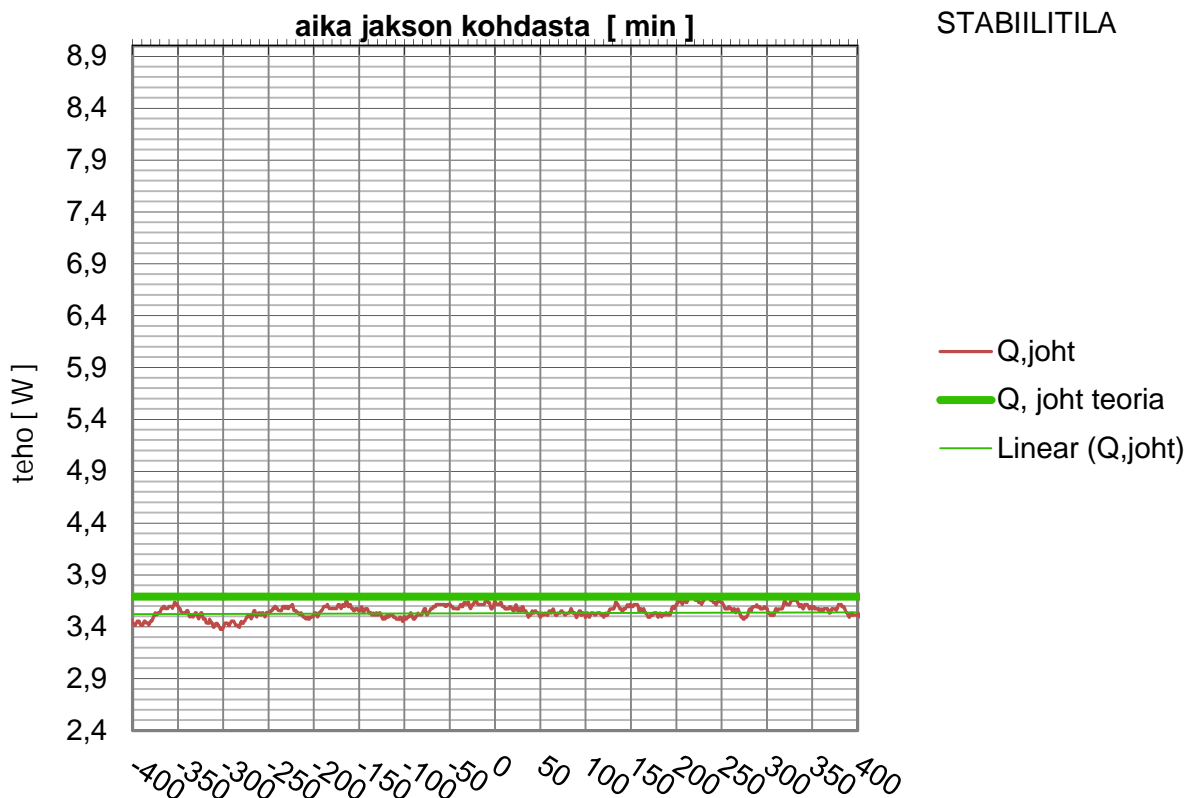
PUH600_2

STABIILITILA

**KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO**

PUH600_2

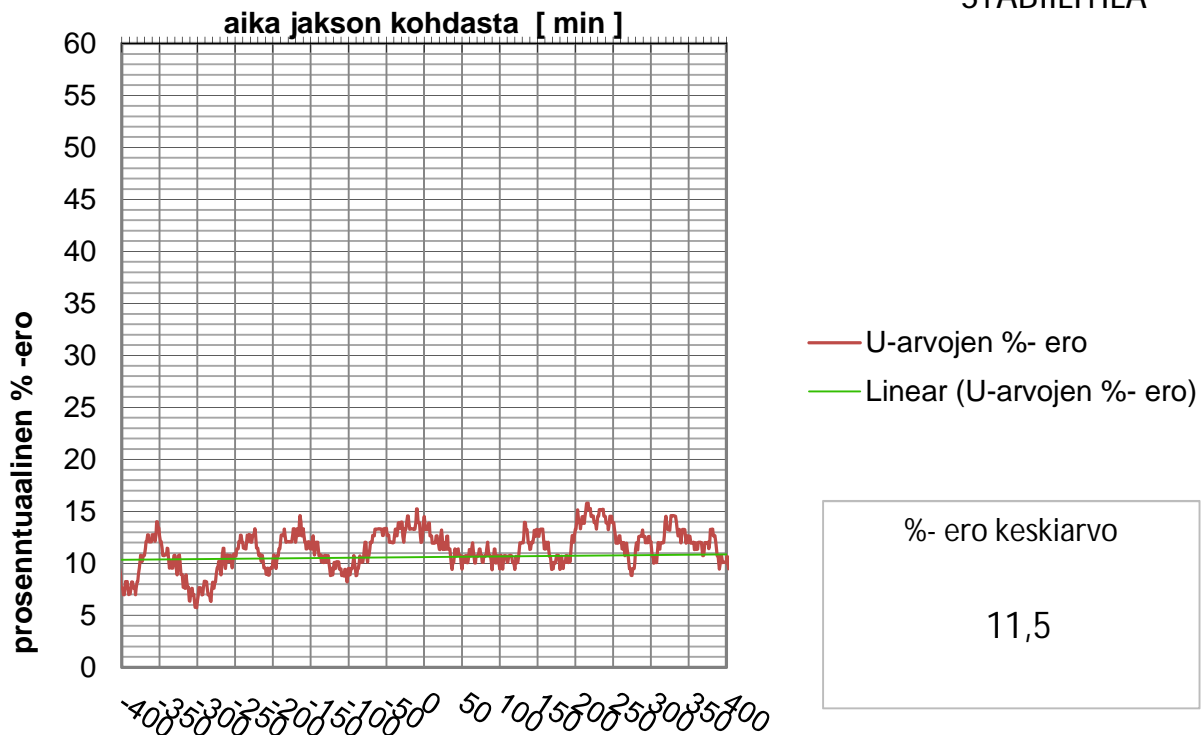
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600_2

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,13

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUH600_2

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

18.4.2012 8:14

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS

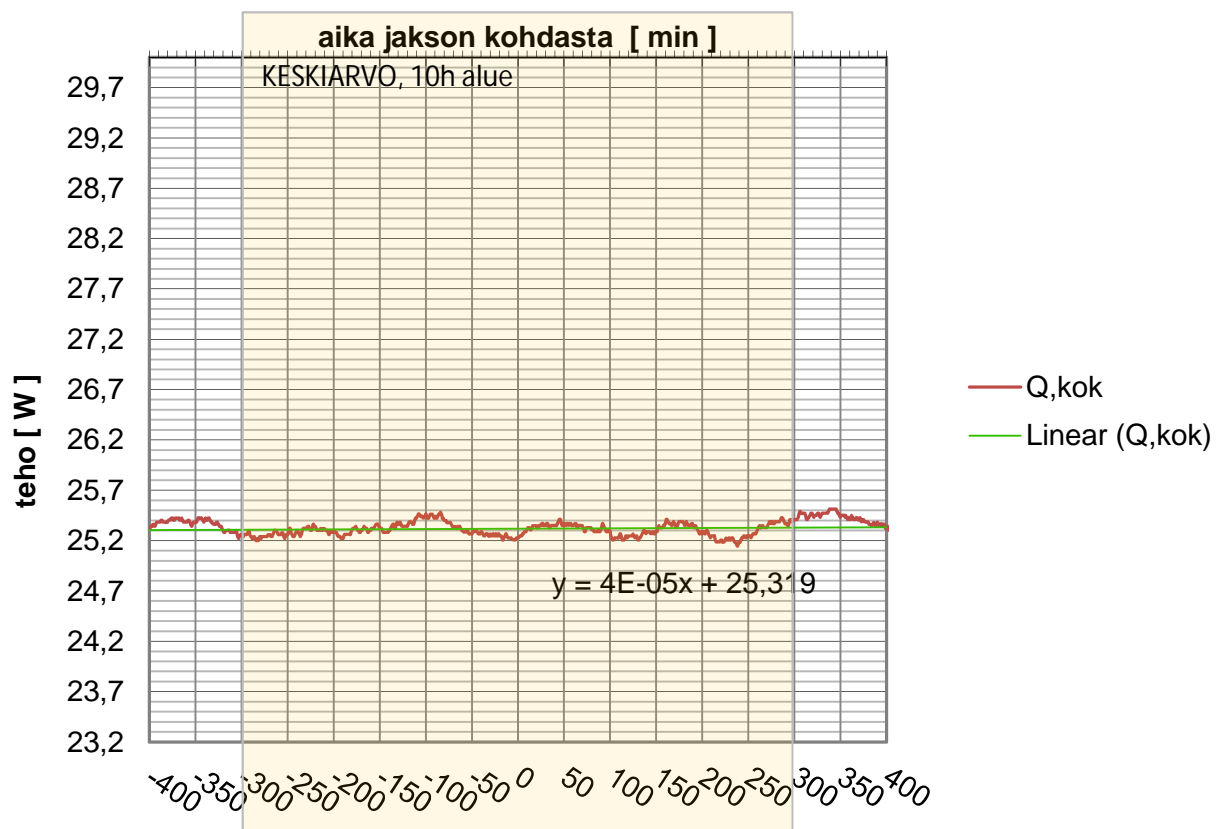
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

6000

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	19,98	20,06	19,89	20,06		20,00	
T,i (KA.) [°C]	19,98	20,05	19,89	20,06		19,99	
							-0,40
T,si [°C]	19,46	19,48	19,92	19,72	19,42	19,60	
T,si (KA.) [°C]	19,45	19,47	19,92	19,72	19,42	19,60	
							-34,34
T,se [°C]	-14,66	-14,70	-14,09	-14,23	-14,10	-14,36	
T,se (KA.) [°C]	-14,67	-14,69	-14,08	-14,21	-14,07	-14,34	
							-0,42
T,e [°C]	-14,83	-14,69				-14,76	
T,e (KA.) [°C]	-14,84	-14,70				-14,77	
Q, kok [W]	25,25 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,40	
Q, joht [W]	3,89				Q, joht (KA.) [W]	3,97	

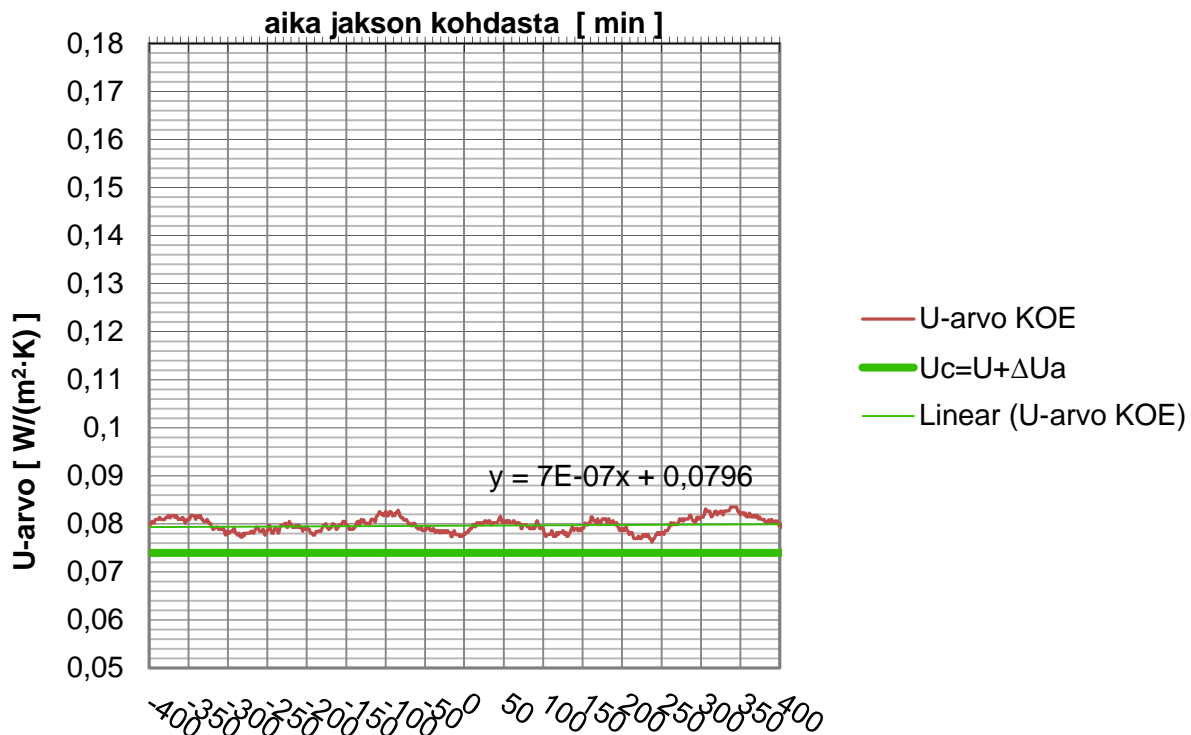
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

PUH600_2

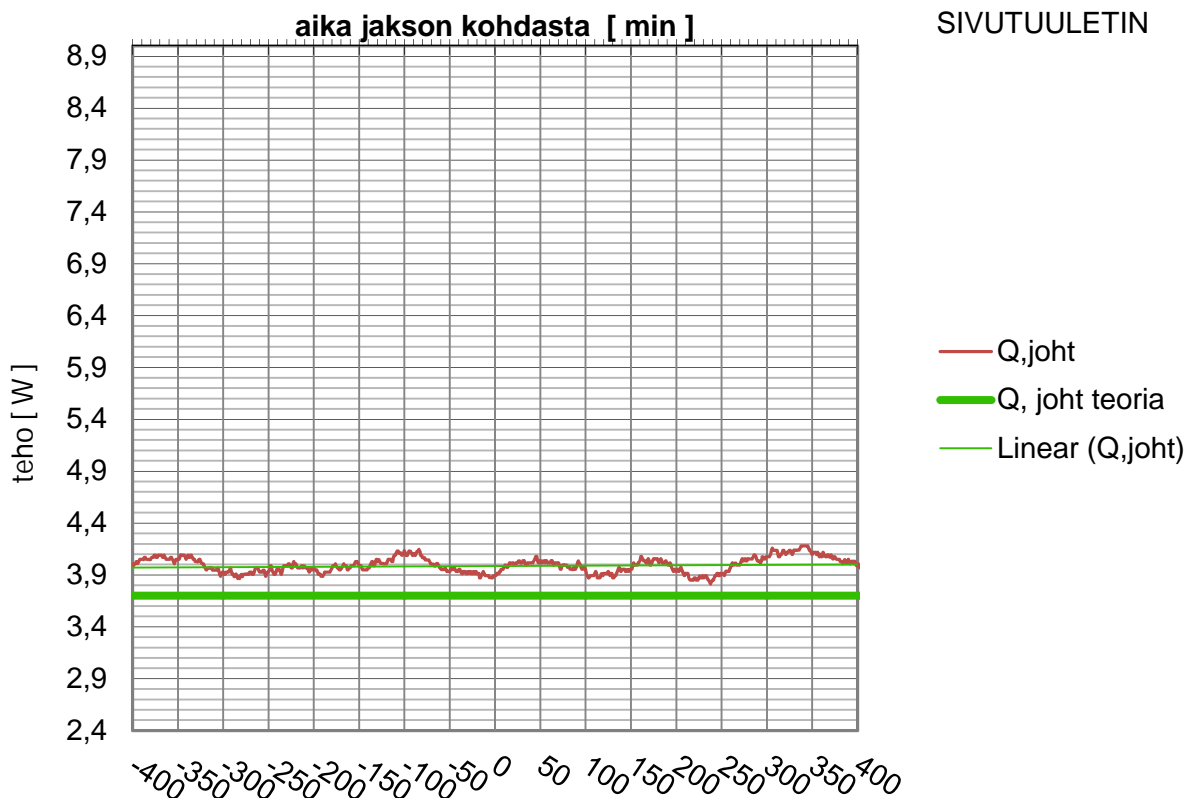
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH600_2

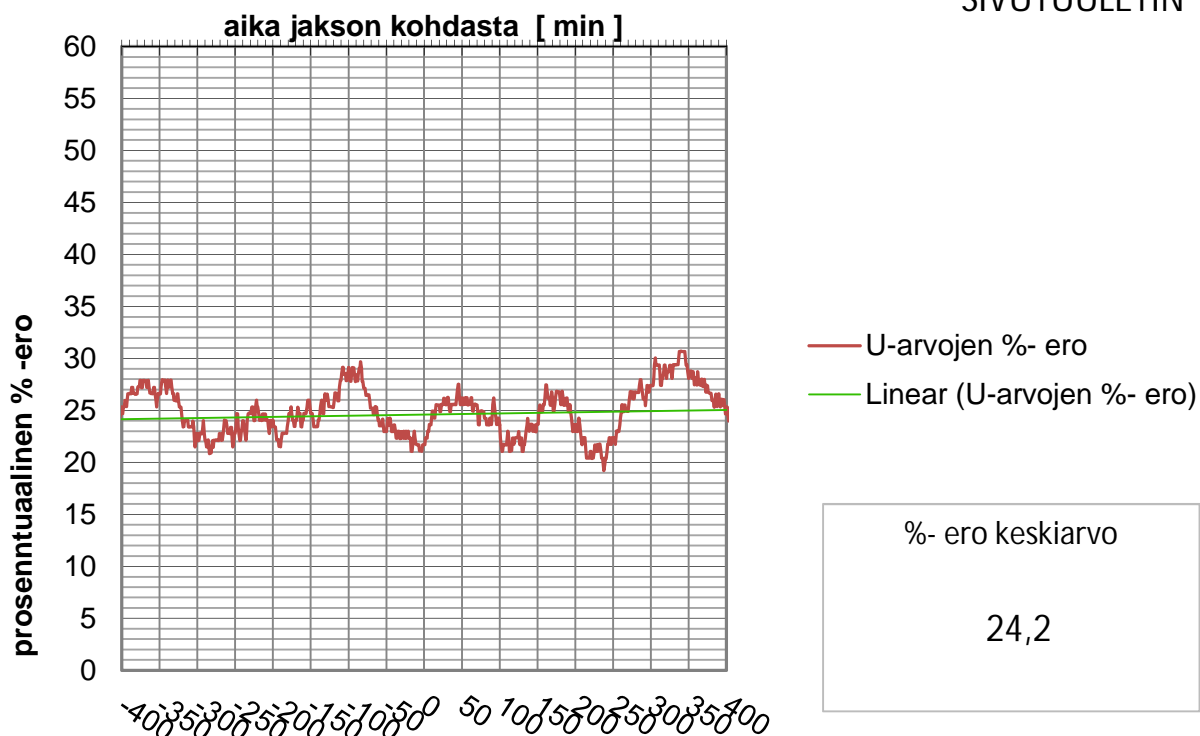
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600_2

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,26

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUH600_2

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAAUS

AIKA

20.4.2012 1:29

(keskiarvo +/- 5 tunnin

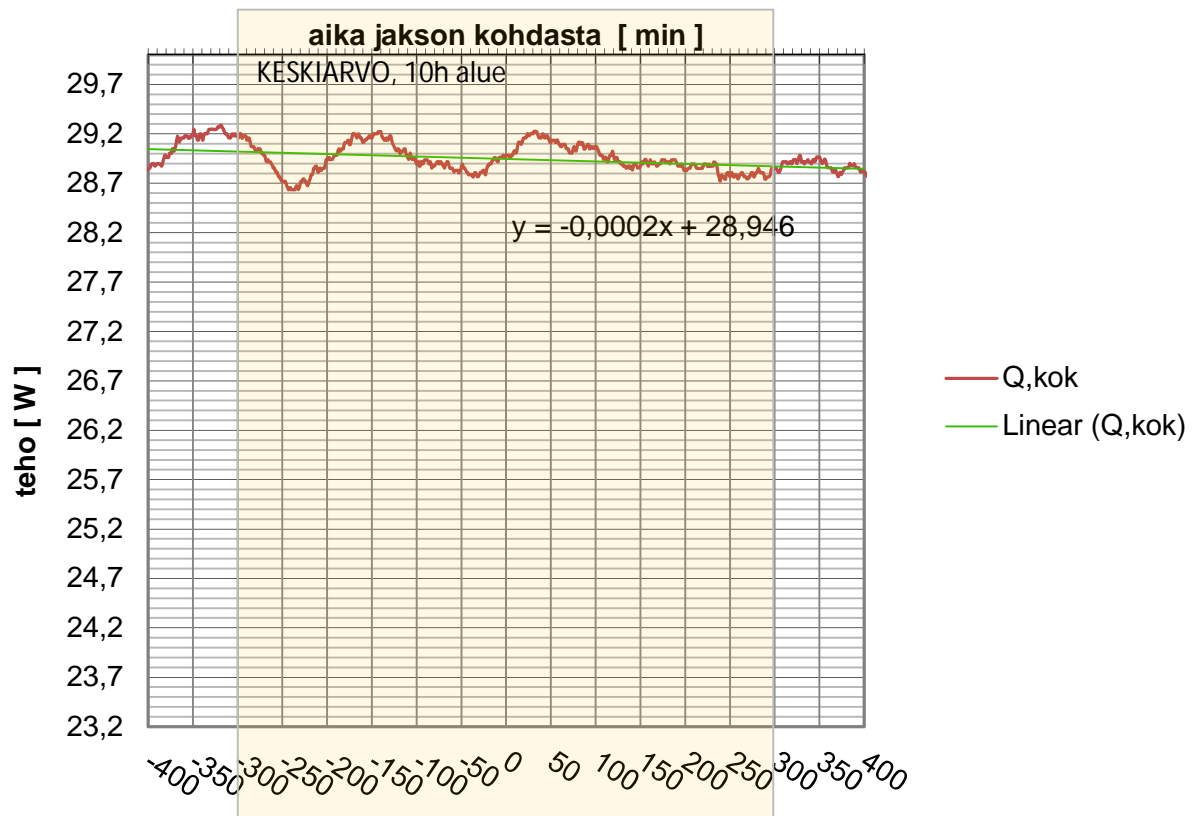
JAKSO

8475

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	19,91	19,73	20,23	20,14		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,94	19,67	20,23	20,15		20,00	
							-1,10
T _{si} [°C]	19,40	19,32	16,12	19,67	19,94	18,89	
T _{si} (KA.) [°C]	19,39	19,33	16,14	19,67	19,94	18,89	
							-34,64
T _{se} [°C]	-14,77	-14,63	-14,57	-14,64	-14,69	-14,66	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,77	-14,61	-14,55	-14,62	-14,68	-14,65	
							-0,17
T _e [°C]	-14,80	-14,83				-14,82	
T _e (KA.) [°C]	-14,80	-14,84				-14,82	
Q, kok [W]	28,98 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	28,85	
Q, joht [W]	7,54				Q, joht (KA.) [W]	7,50	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

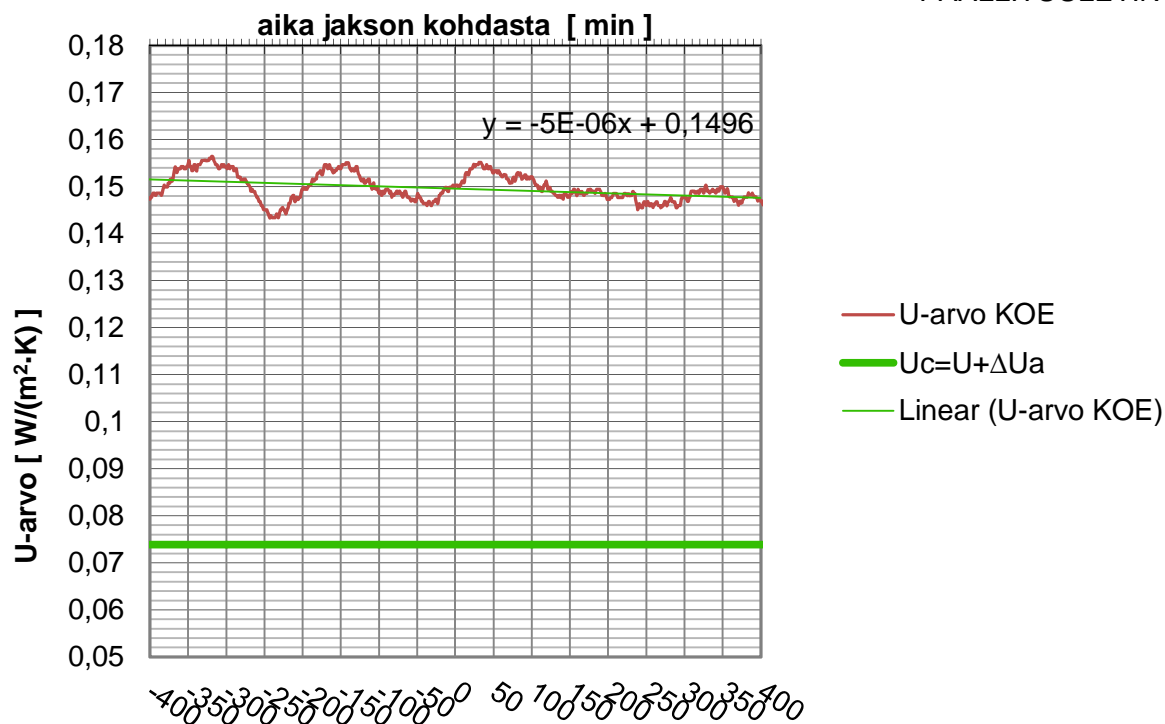


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH600_2

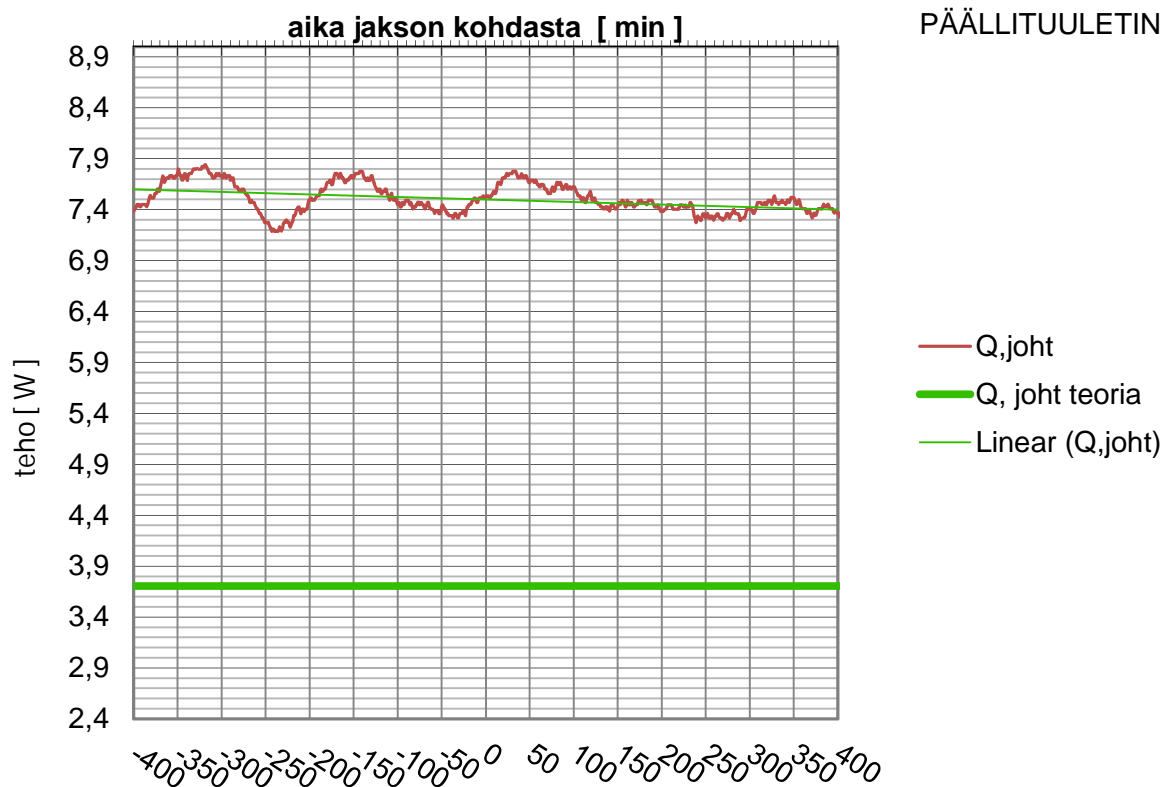
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH600_2

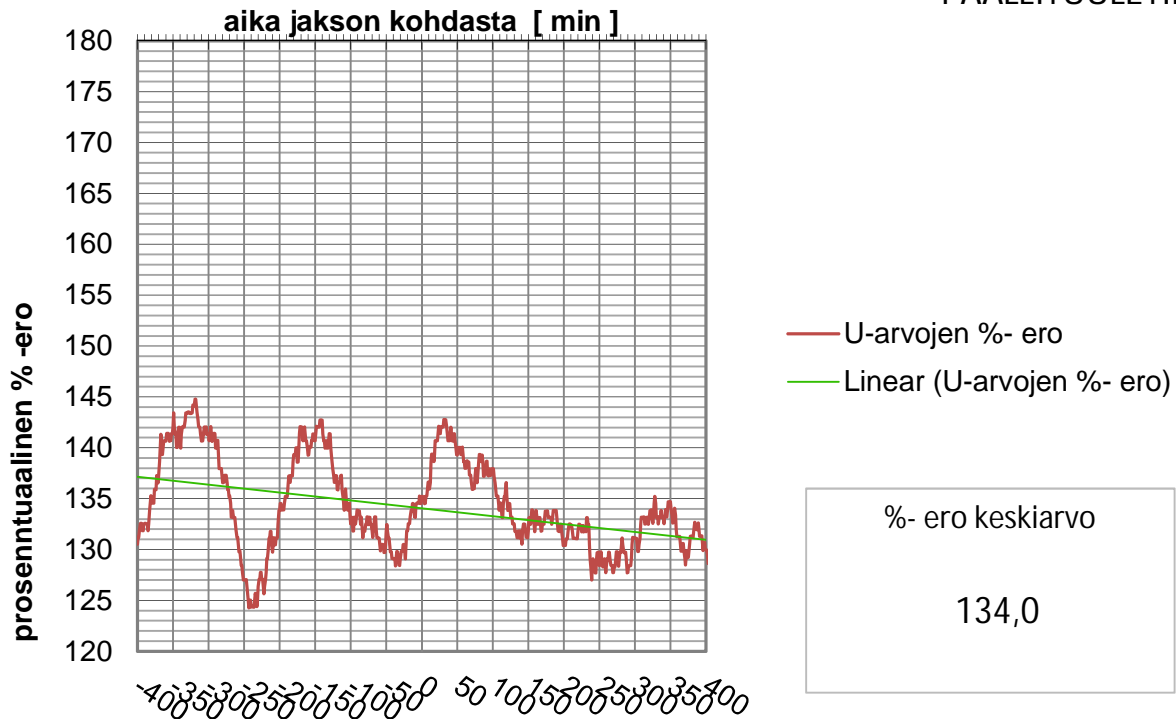
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600_2

PÄÄLLITUULETIN



Nusseltin luku

2,41

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

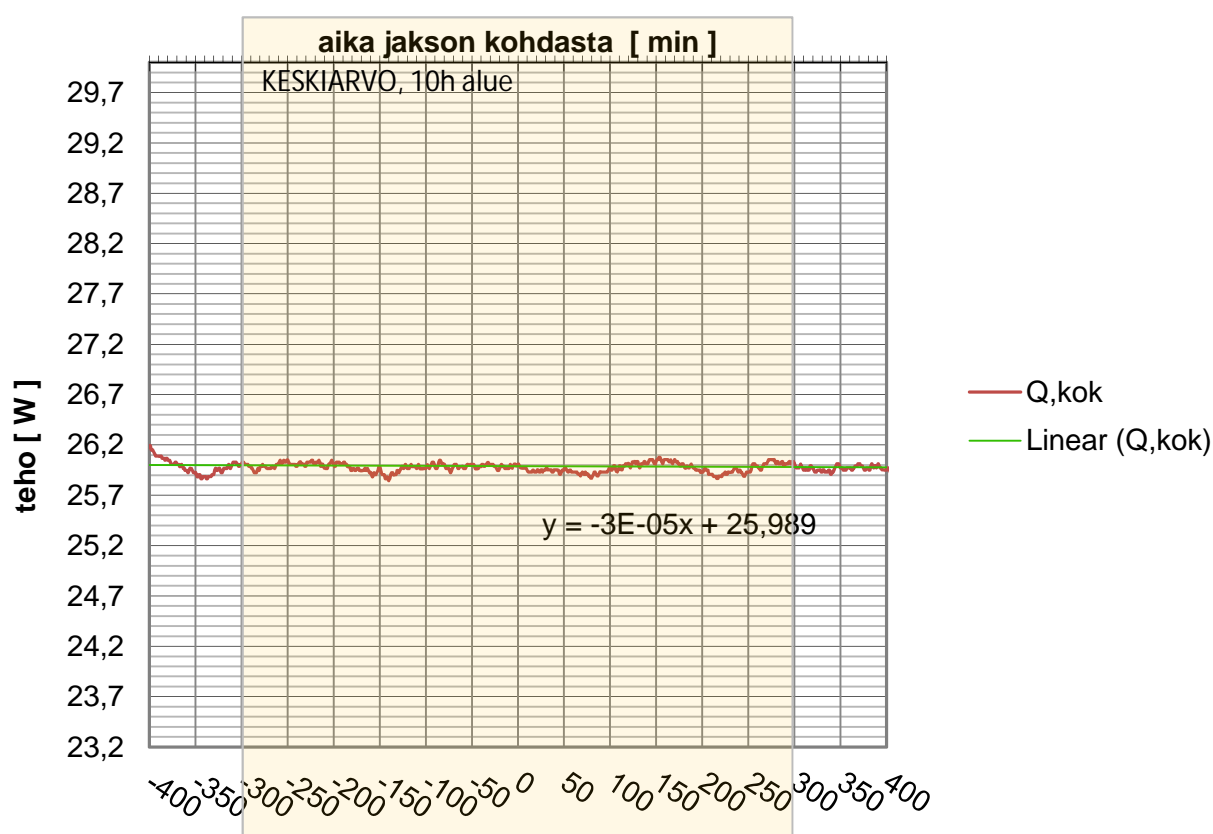
KOE	PUH600T
TILANNE	STABIILITILA
AIKA	2.3.2012 7:13
JAKSO	5150

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

(keskiarvo +/- 5 tunnin
ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	20,02	19,93	20,06		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,01	20,02	19,93	20,06		20,00	
							-0,38
T,si [°C]	19,43	19,57	19,84	19,75	19,50	19,62	
T,si (KA.) [°C]	19,42	19,57	19,84	19,75	19,50	19,62	
							-33,96
T,se [°C]	-13,82	-14,26	-13,74	-14,29	-13,64	-13,95	
T,se (KA.) [°C]	-13,84	-14,27	-13,76	-14,30	-13,64	-13,96	
							-0,96
T,e [°C]	-15,00	-14,91				-14,95	
T,e (KA.) [°C]	-14,97	-14,87				-14,92	
Q, kok [W]	25,97 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	26,00	
Q, joht [W]	4,59				Q, joht (KA.) [W]	4,56	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

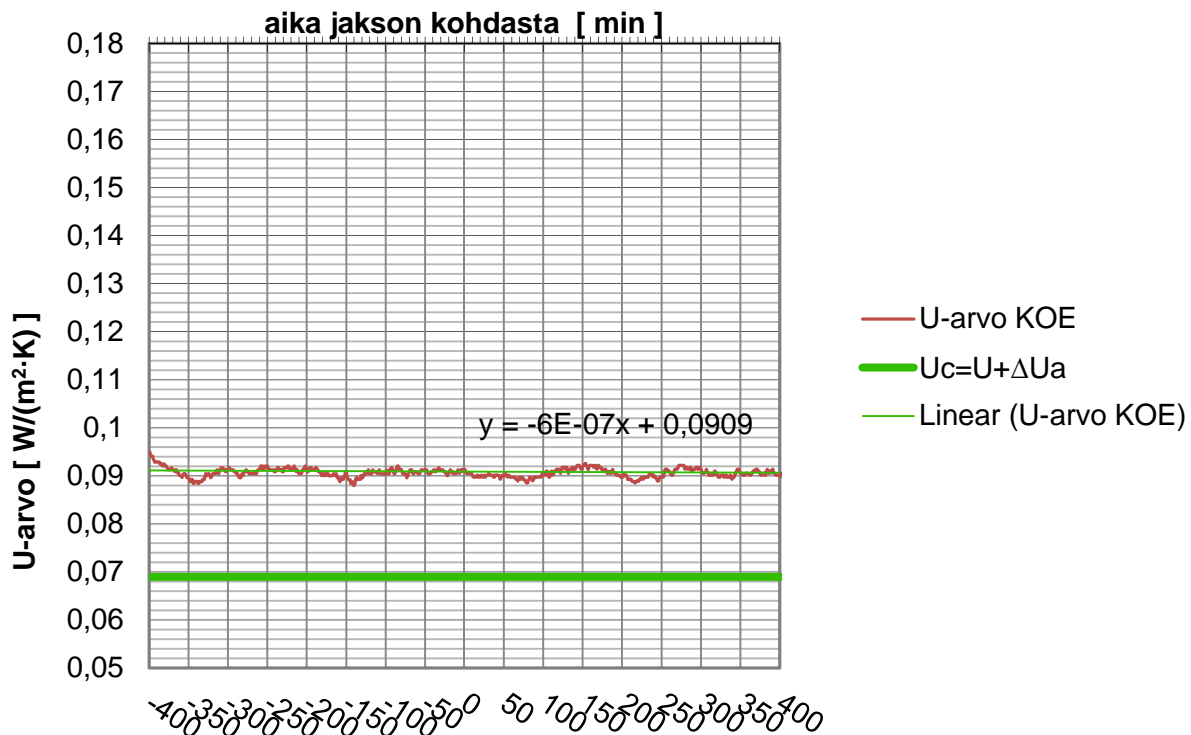


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

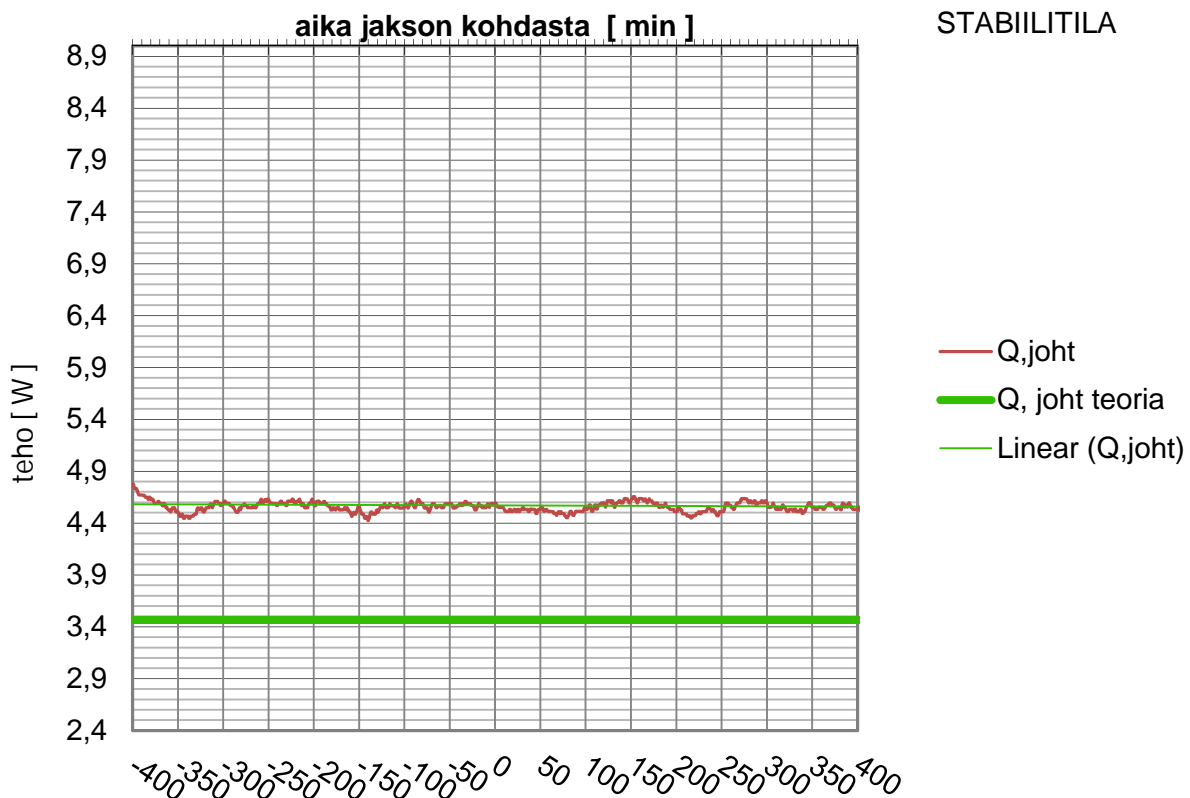
PUH600T

STABIILITILA

**KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO**

PUH600T

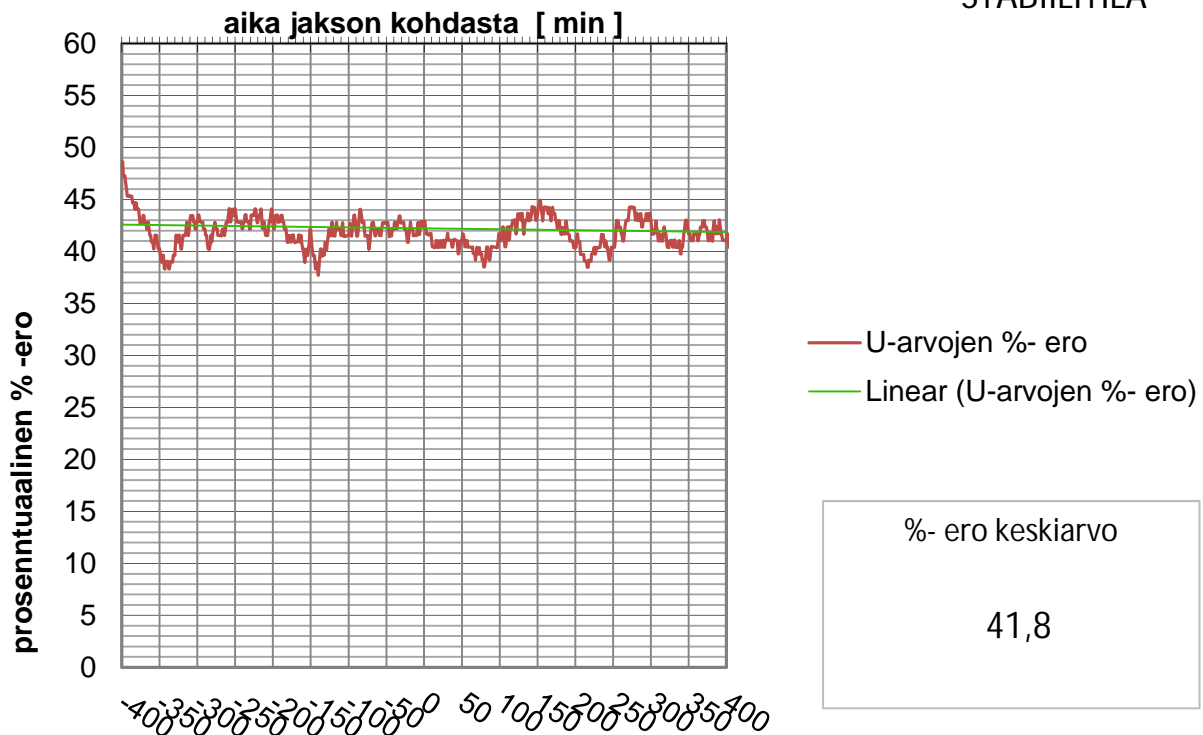
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600T

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,46

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

PUH600T

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

3.3.2012 15:43

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

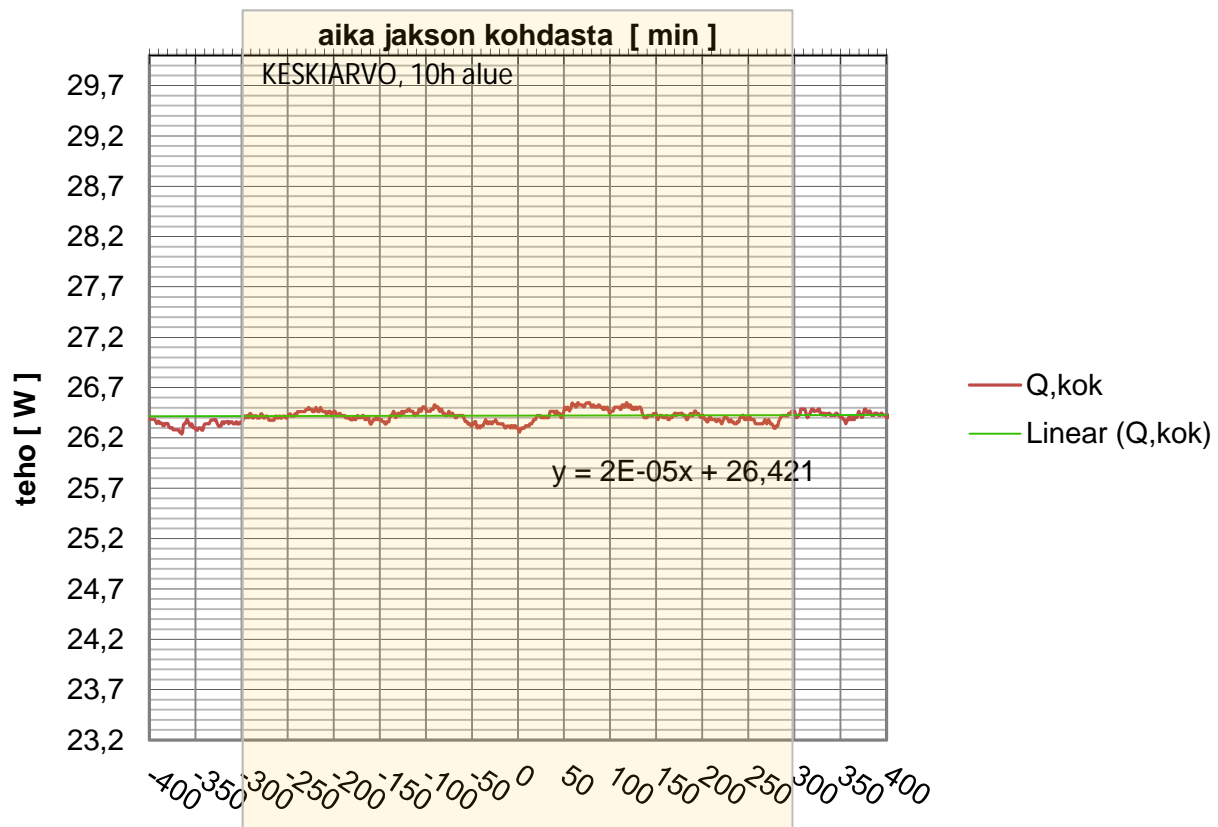
JAKSO

7100

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	20,00	19,92	20,07		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,00	20,03	19,92	20,05		20,00	
							-0,41
T,si [°C]	19,41	19,43	19,88	19,76	19,50	19,60	
T,si (KA.) [°C]	19,42	19,42	19,88	19,76	19,51	19,60	
							-33,83
T,se [°C]	-13,55	-14,24	-13,67	-14,22	-13,44	-13,82	
T,se (KA.) [°C]	-13,55	-14,25	-13,68	-14,23	-13,44	-13,83	
							-1,23
T,e [°C]	-15,03	-15,04				-15,04	
T,e (KA.) [°C]	-15,04	-15,07				-15,05	
Q, kok [W]	26,28 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	26,44	
Q, joht [W]	4,96				Q, joht (KA.) [W]	5,08	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

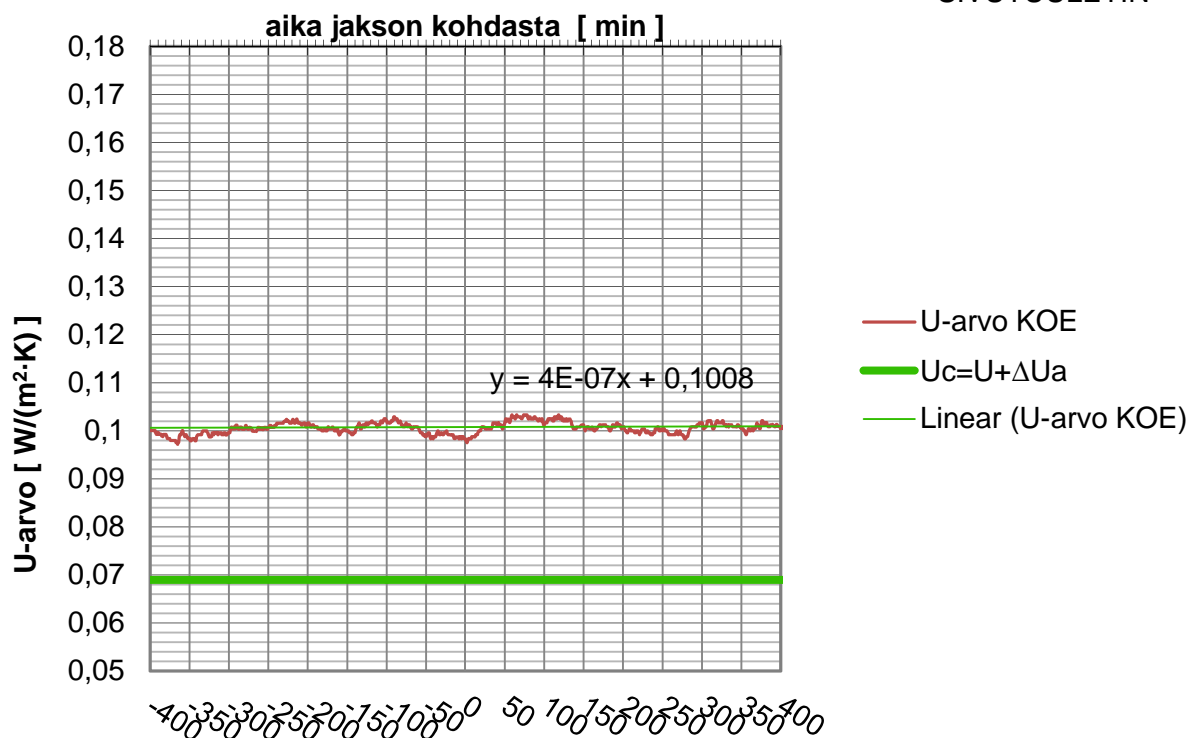


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

PUH600T

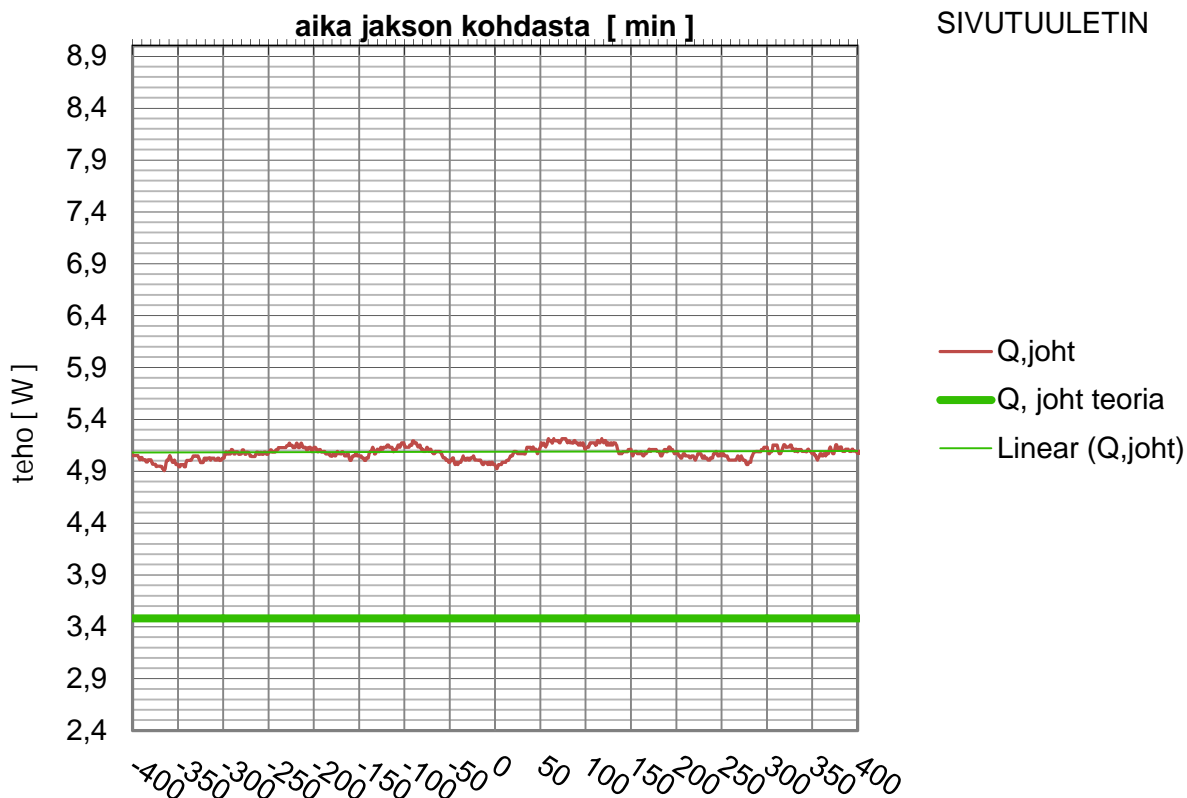
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

PUH600T

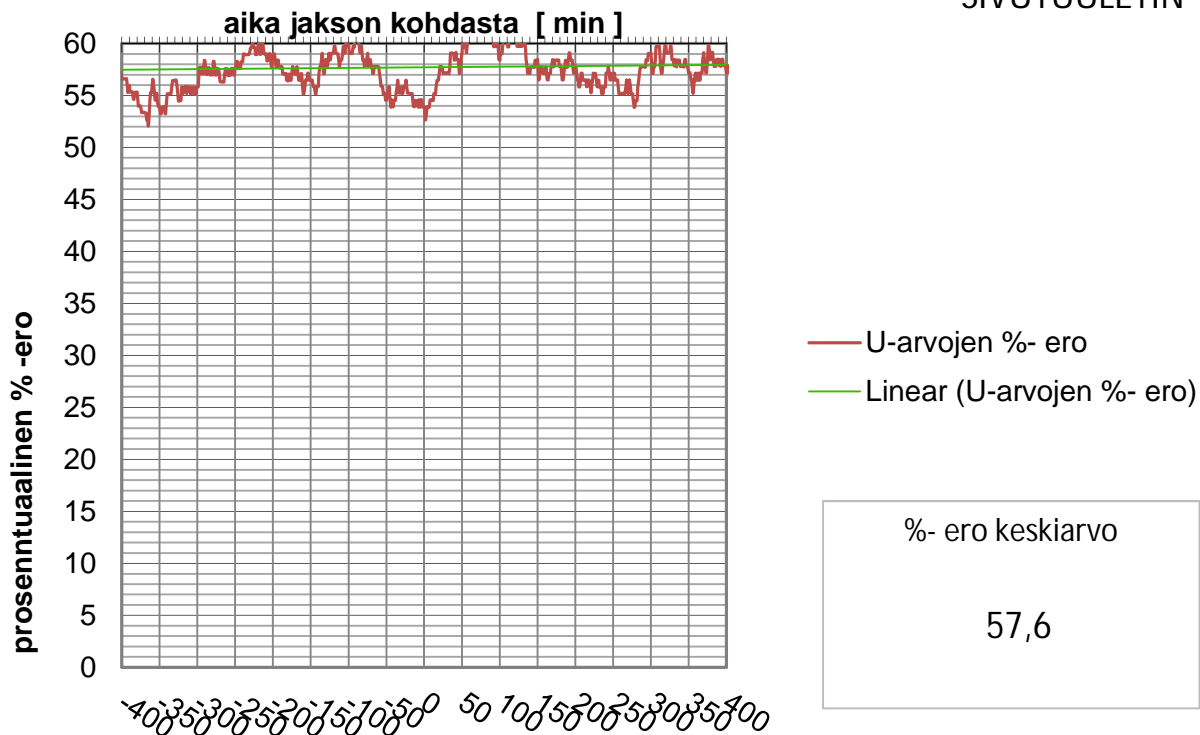
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600T

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,64

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

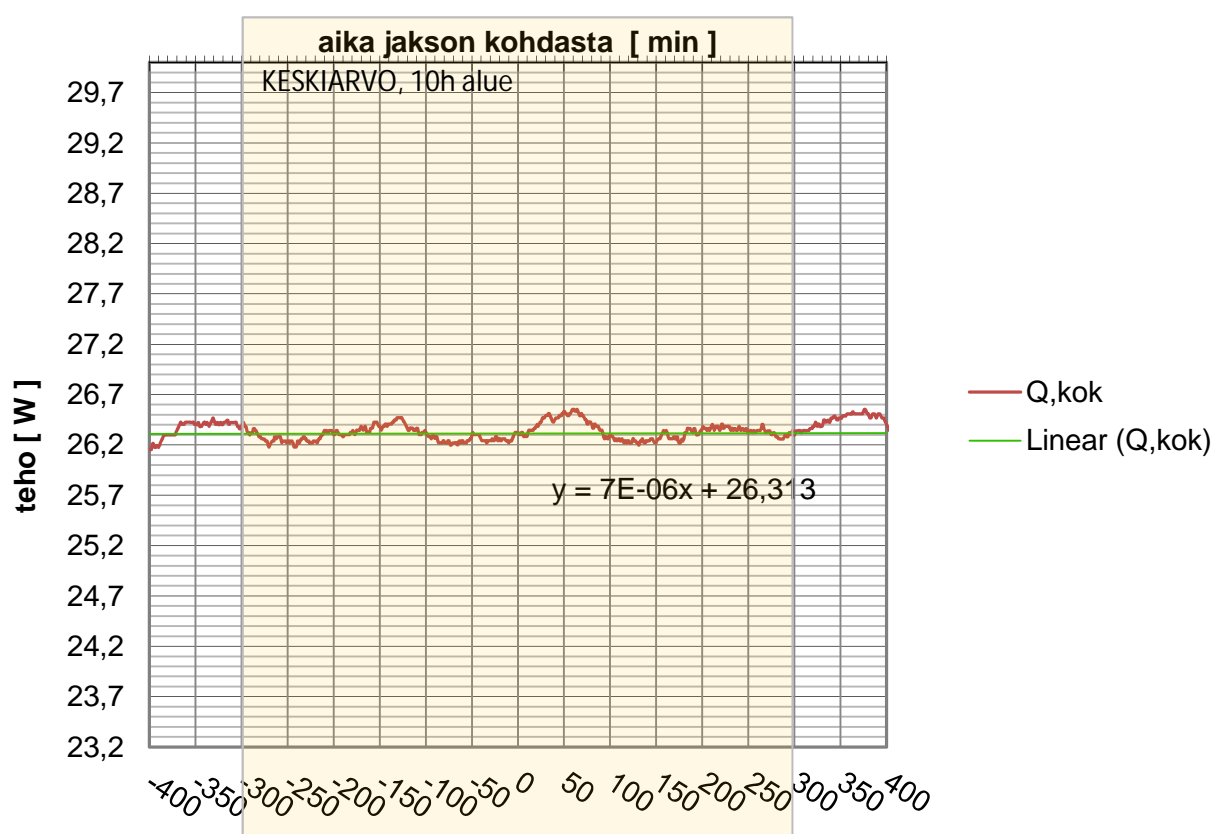
KOE	PUH600T
TILANNE	PÄÄLLITUULETIN
AIKA	5.3.2012 0:23
JAKSO	9060

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin
ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	20,02	19,92	20,05		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,00	20,02	19,92	20,05		20,00	
							-0,40
T,si [°C]	19,41	19,42	19,88	19,76	19,50	19,59	
T,si (KA.) [°C]	19,42	19,42	19,88	19,75	19,50	19,59	
							-33,86
T,se [°C]	-13,56	-14,28	-13,71	-14,26	-13,45	-13,85	
T,se (KA.) [°C]	-13,57	-14,29	-13,71	-14,27	-13,46	-13,86	
							-1,23
T,e [°C]	-15,12	-15,16				-15,14	
T,e (KA.) [°C]	-15,08	-15,10				-15,09	
Q, kok [W]	26,30 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	26,33	
Q, joht [W]	4,88				Q, joht (KA.) [W]	4,87	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

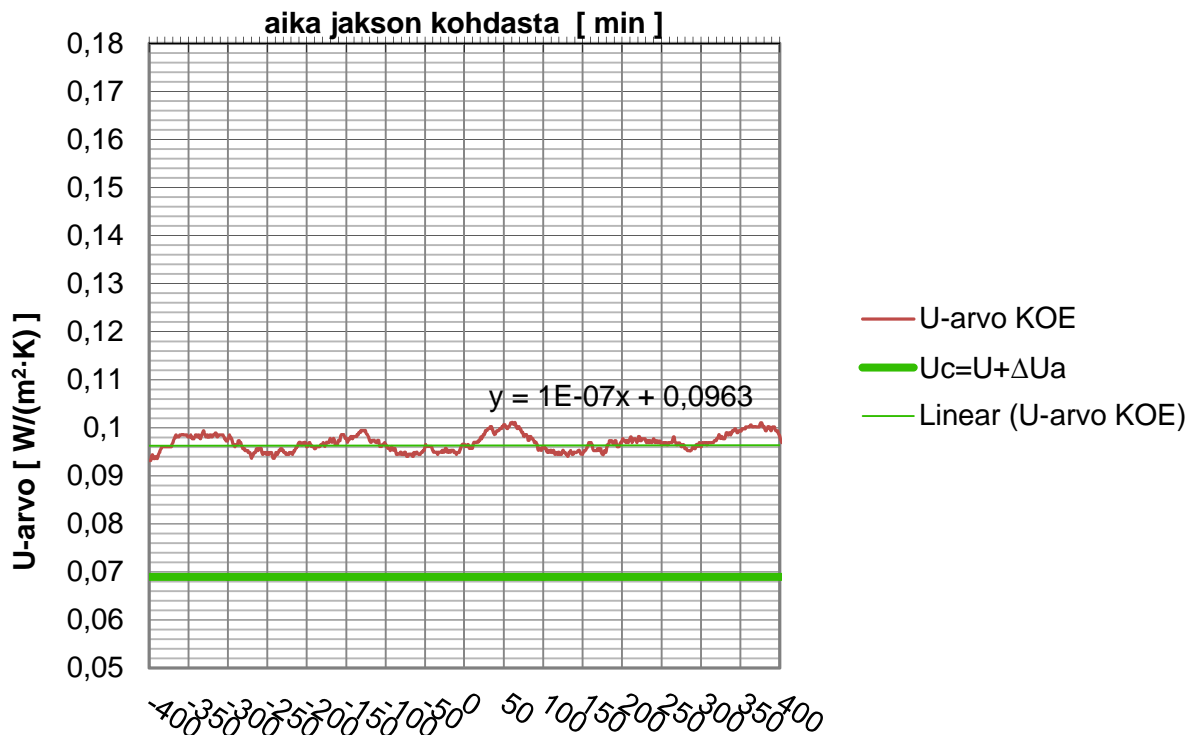


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

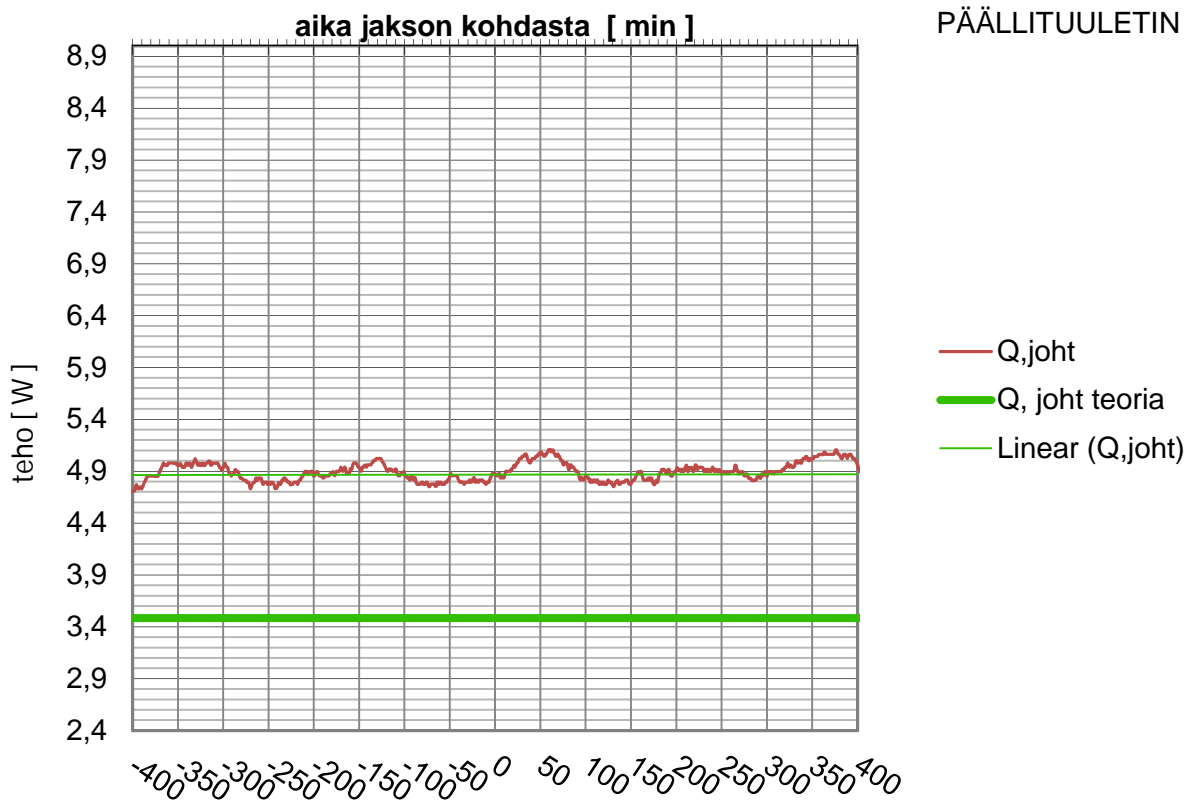
PUH600T

PÄÄLLITUULETIN

**KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO**

PUH600T

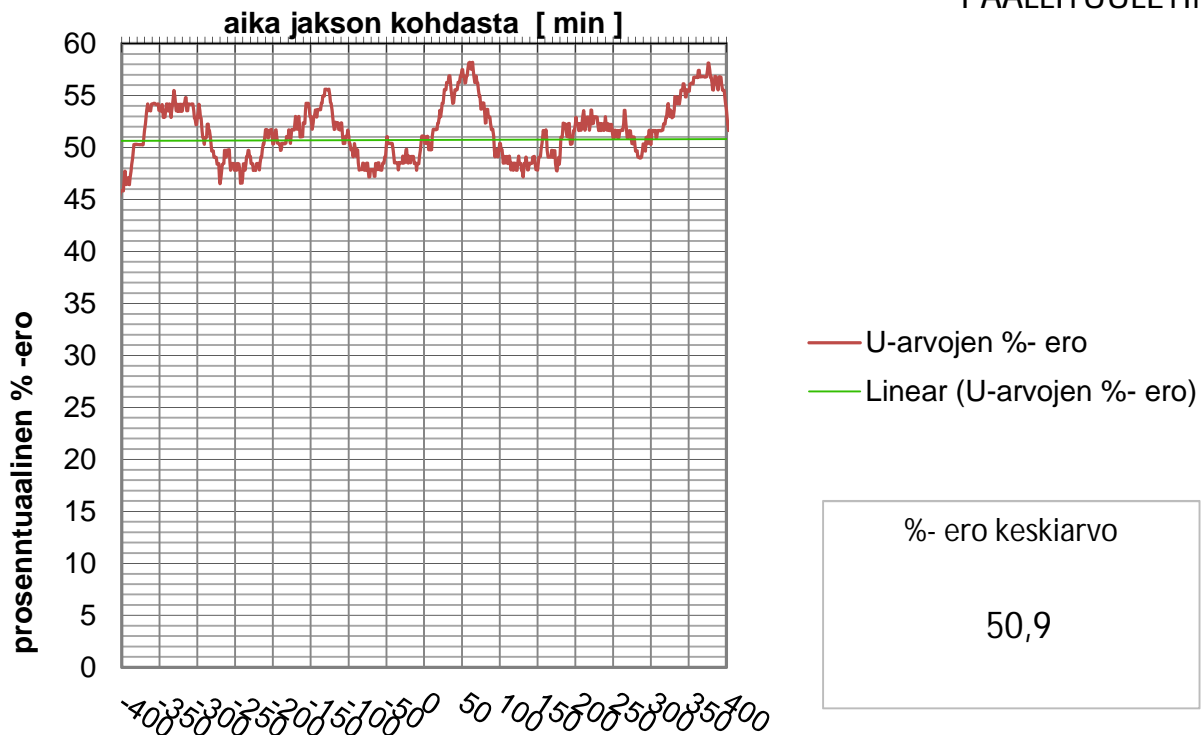
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

PUH600T

PÄÄLLITUULETIN



Nusselt in luku

1,57

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVY600

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

8.3.2012 5:32

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

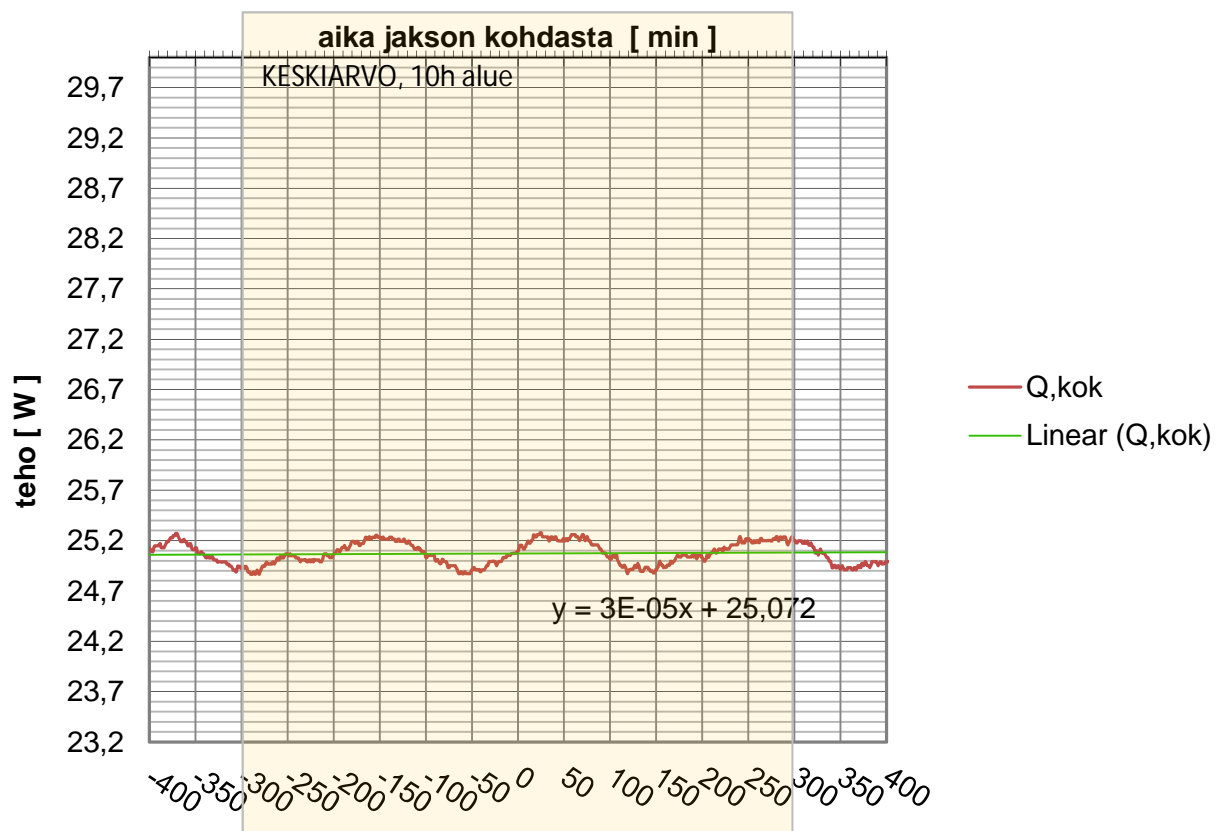
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

3675

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIVARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,02	19,91	20,06		20,00	
T _i (KA.) [°C]	20,00	20,01	19,93	20,07		20,00	
							-0,30
T _{si} [°C]	19,47	19,62	19,89	19,83	19,66	19,69	
T _{si} (KA.) [°C]	19,47	19,62	19,90	19,84	19,66	19,70	
							-34,52
T _{se} [°C]	-14,62	-14,52	-14,45	-14,54	-14,42	-14,51	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,62	-14,53	-14,46	-14,54	-14,42	-14,51	
							-0,25
T _e [°C]	-14,85	-14,67				-14,76	
T _e (KA.) [°C]	-14,87	-14,67				-14,77	
Q, kok [W]	25,15 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,21	
Q, joht [W]	3,67				Q, joht (KA.) [W]	3,66	

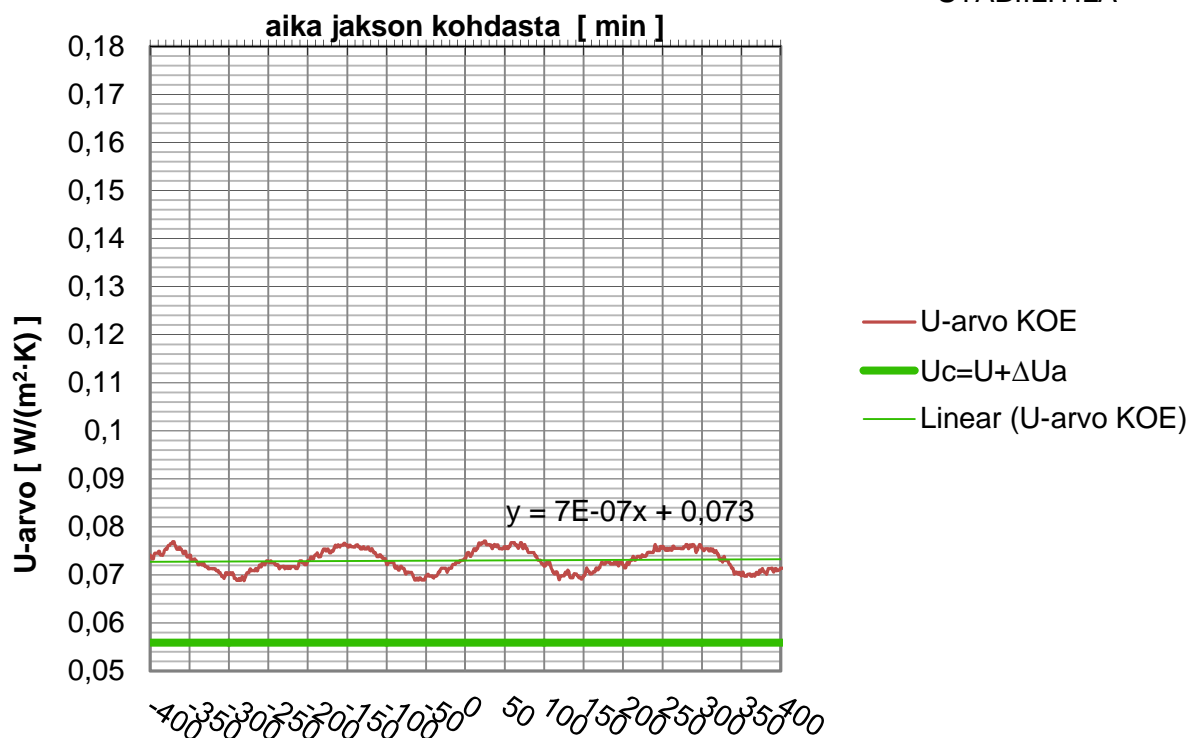
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

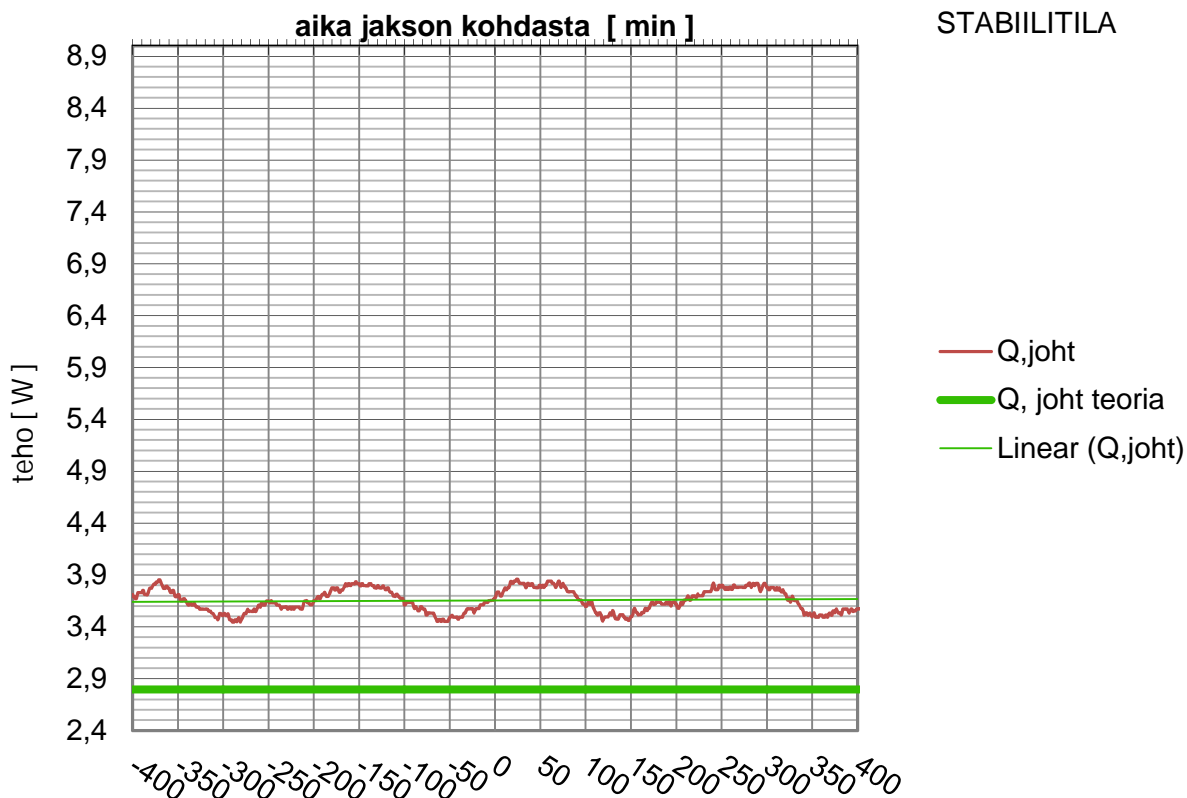
LEVY600

STABIILITILA

**KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO**

LEVY600

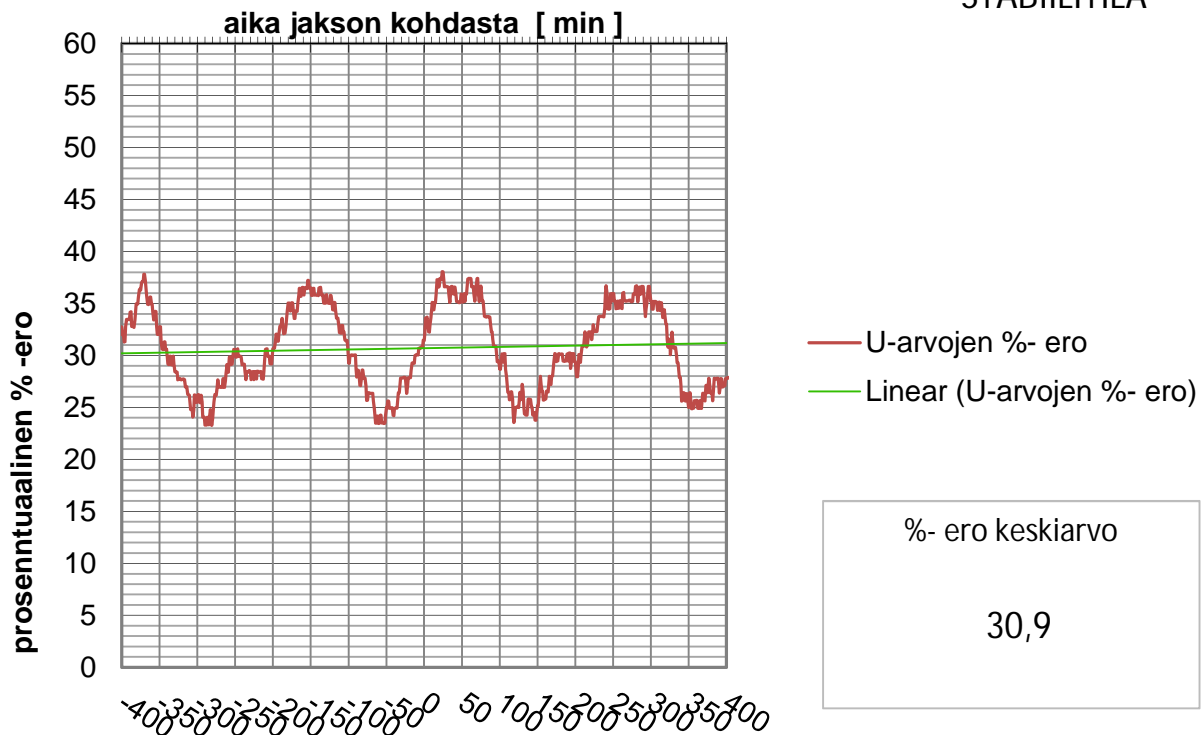
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVY600

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,32

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVY600

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

9.3.2012 1:07

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAUS

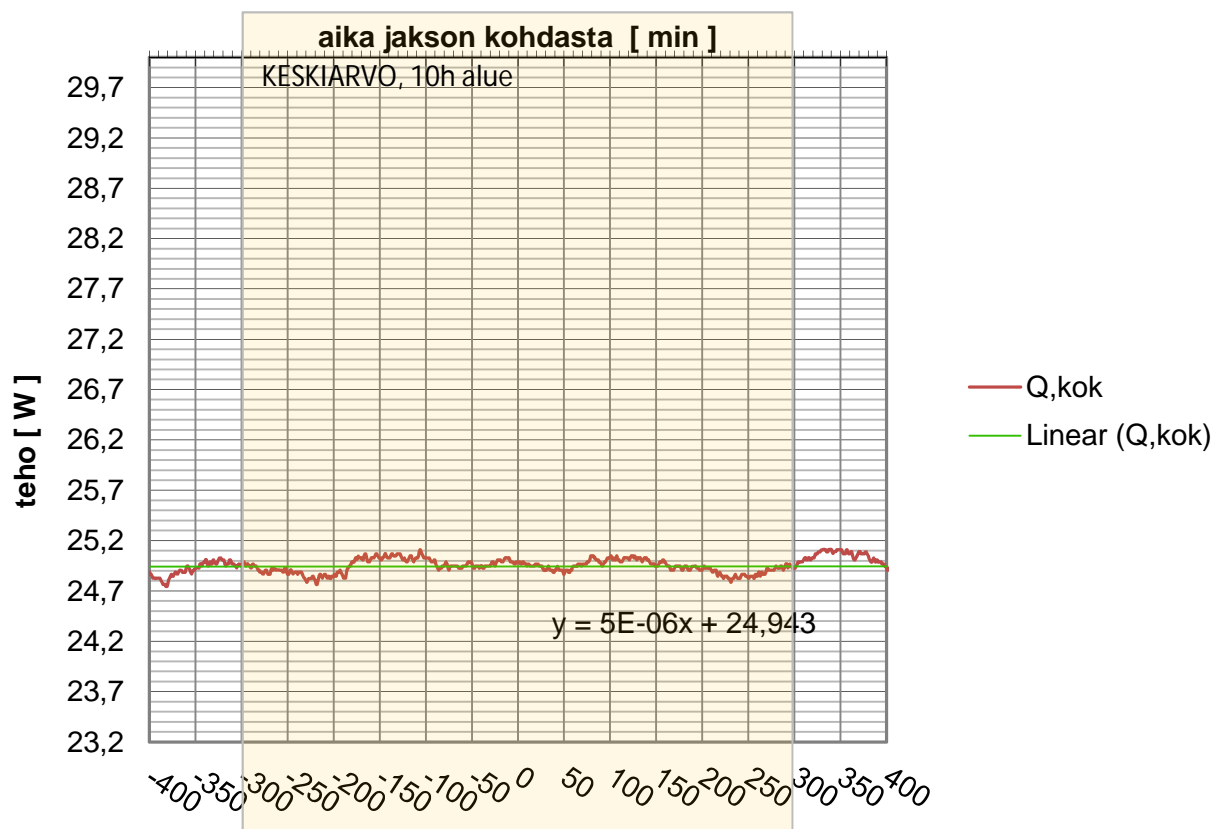
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

4850

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIJARVO	ERO
T,i [°C]	19,99	20,03	19,92	20,05		20,00	
T,i (KA.) [°C]	19,99	20,02	19,91	20,07		20,00	
							-0,30
T,si [°C]	19,47	19,62	19,91	19,84	19,66	19,70	
T,si (KA.) [°C]	19,46	19,61	19,91	19,84	19,65	19,70	
							-34,68
T,se [°C]	-14,80	-14,77	-14,66	-14,67	-14,55	-14,69	
T,se (KA.) [°C]	-14,79	-14,76	-14,65	-14,66	-14,54	-14,68	
							-0,25
T,e [°C]	-14,99	-14,90				-14,95	
T,e (KA.) [°C]	-14,97	-14,88				-14,92	
Q, kok [W]	24,97 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,94	
Q, joht [W]	3,65				Q, joht (KA.) [W]	3,61	

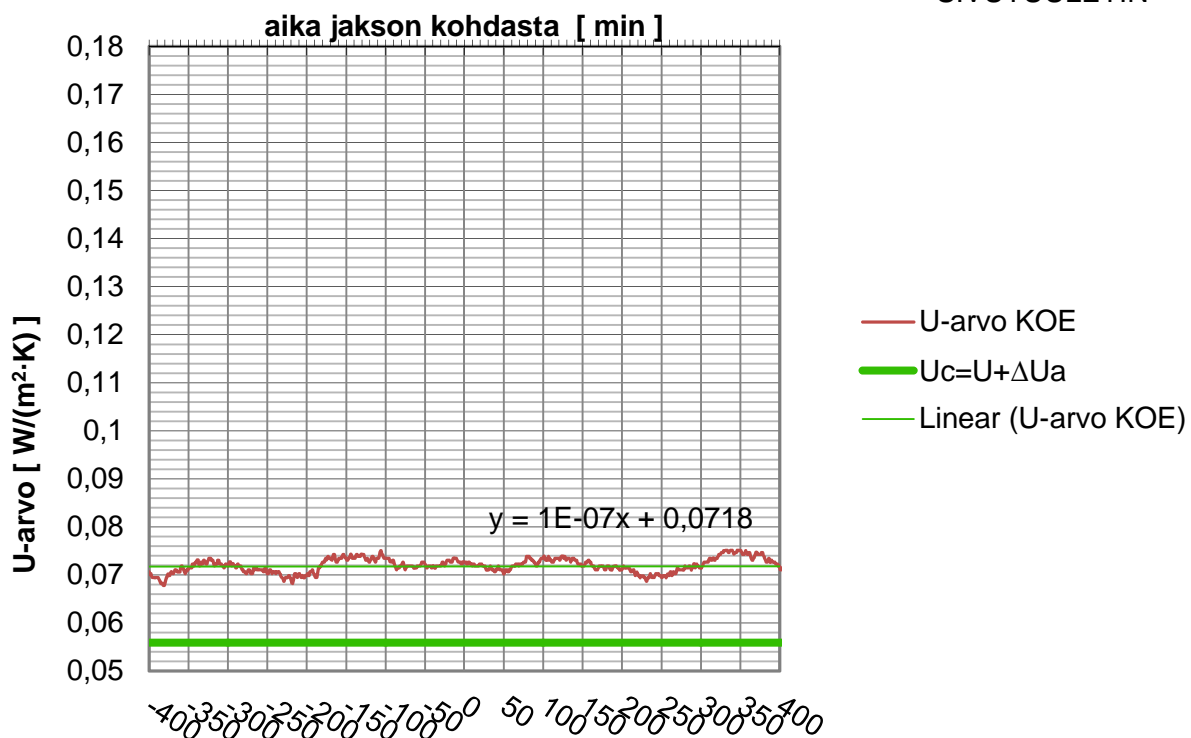
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

LEVY600

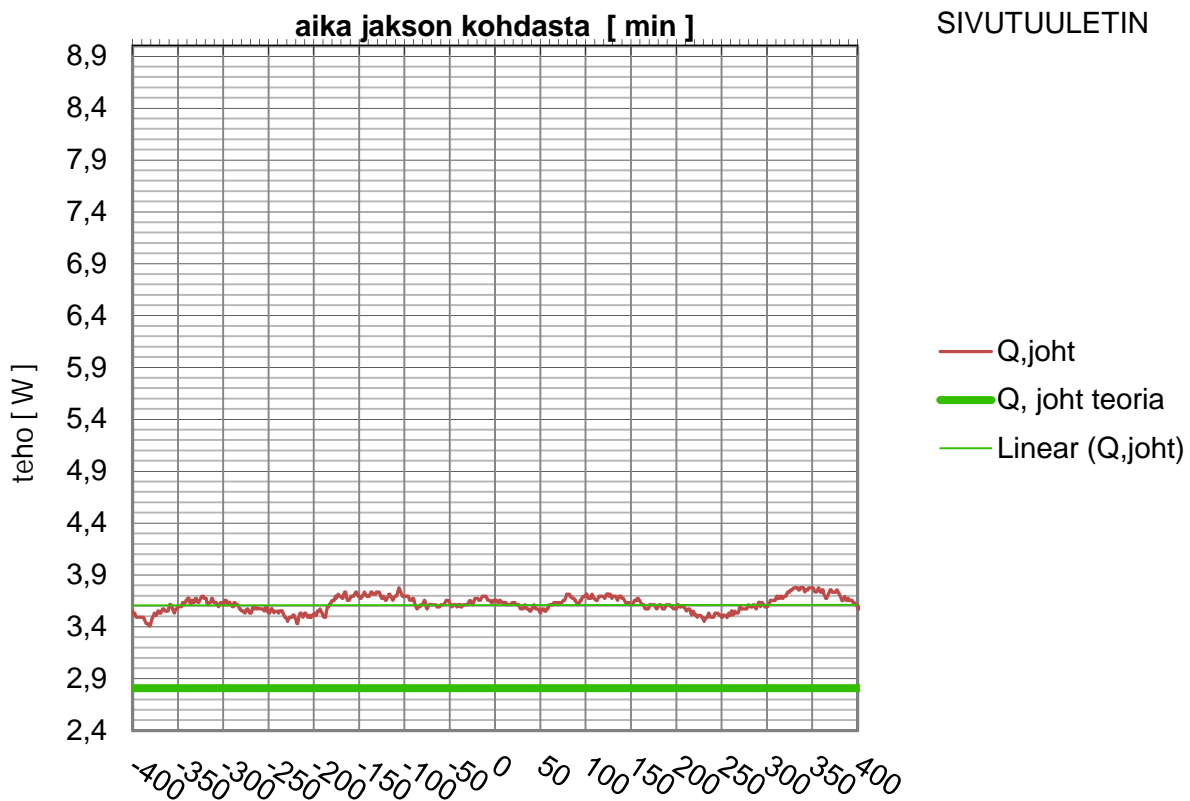
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVY600

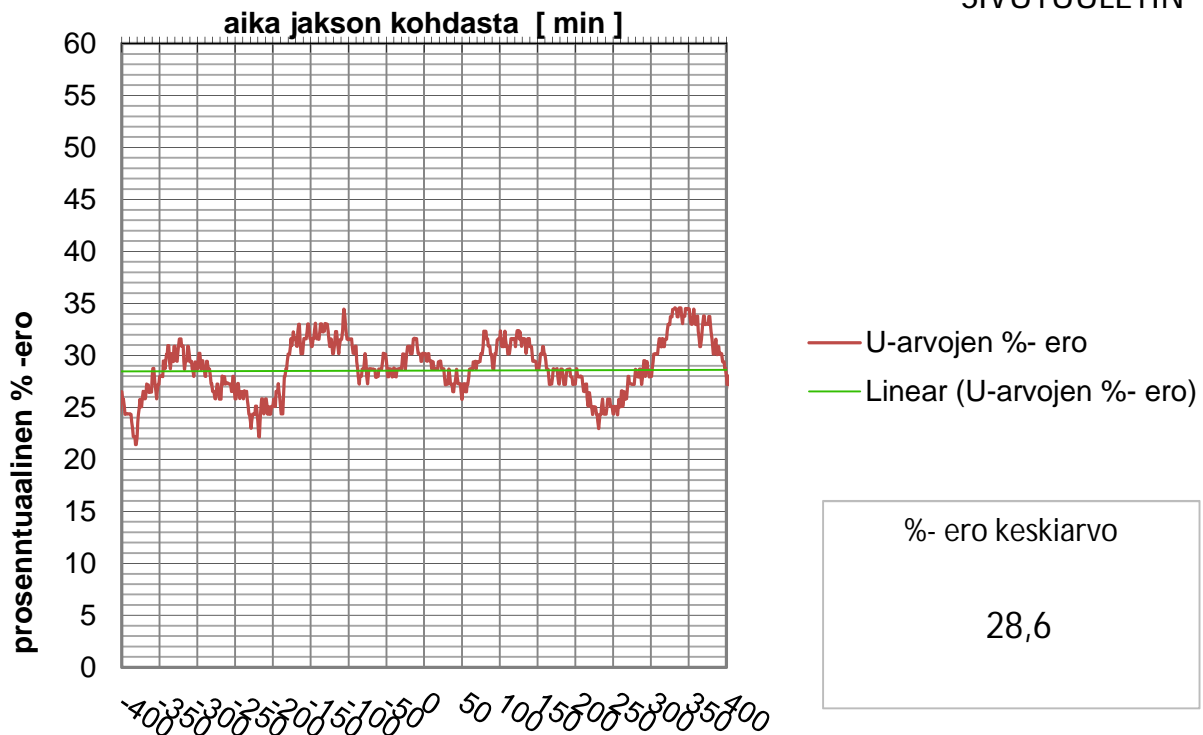
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVY600

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,30

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVY600

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

AIKA

11.3.2012 3:07

JAKSO

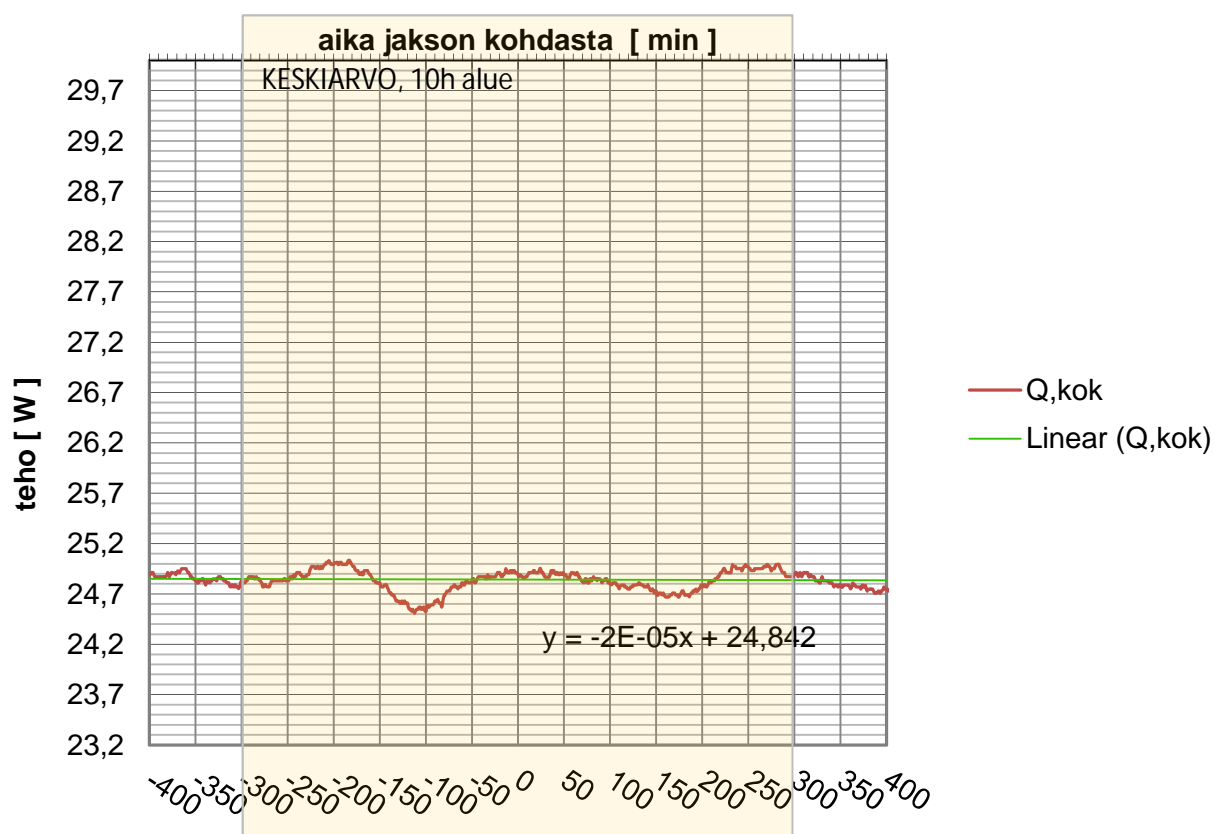
7850

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	20,00	20,00	19,93	20,08		20,00	
T,i (KA.) [°C]	20,00	19,99	19,94	20,08		20,00	
							-0,32
T,si [°C]	19,45	19,60	19,83	19,84	19,66	19,68	
T,si (KA.) [°C]	19,45	19,61	19,83	19,84	19,67	19,68	
							-34,84
T,se [°C]	-14,91	-14,81	-14,76	-14,86	-14,85	-14,84	
T,se (KA.) [°C]	-14,91	-14,81	-14,76	-14,87	-14,85	-14,84	
							-0,16
T,e [°C]	-14,98	-14,99				-14,99	
T,e (KA.) [°C]	-14,99	-15,01				-15,00	
Q, kok [W]	24,89 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,89	
Q, joht [W]	3,44				Q, joht (KA.) [W]	3,39	

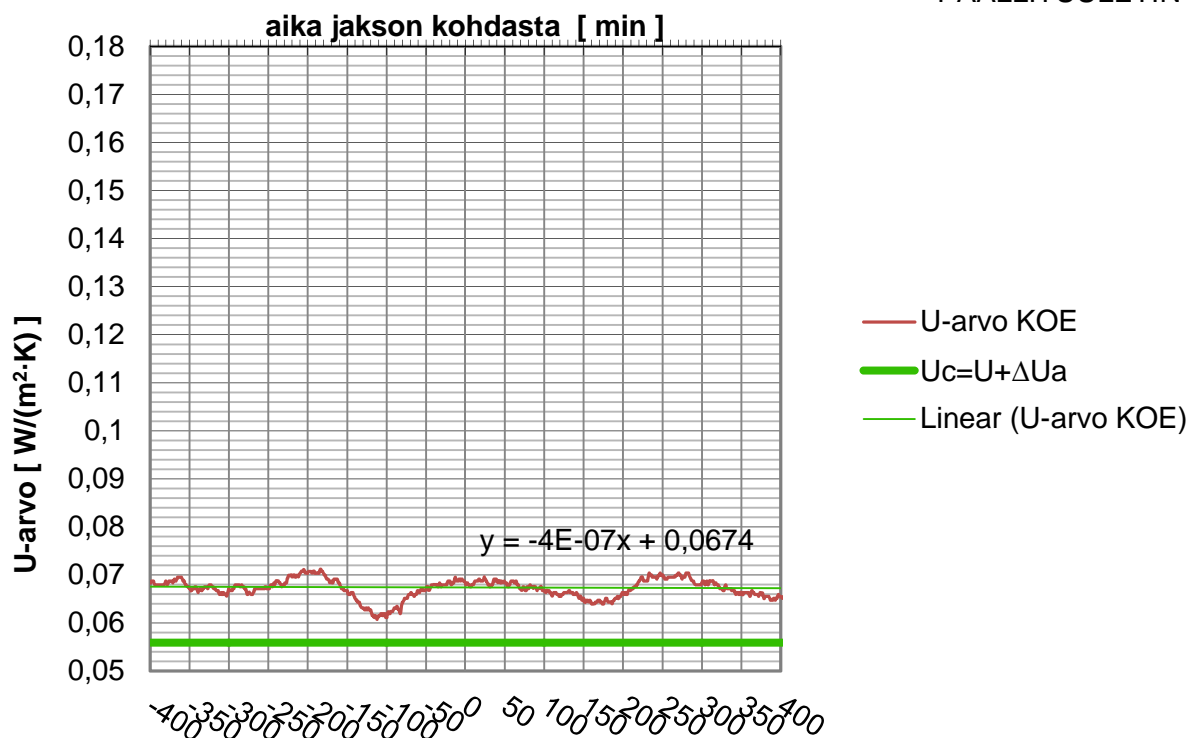
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVY600

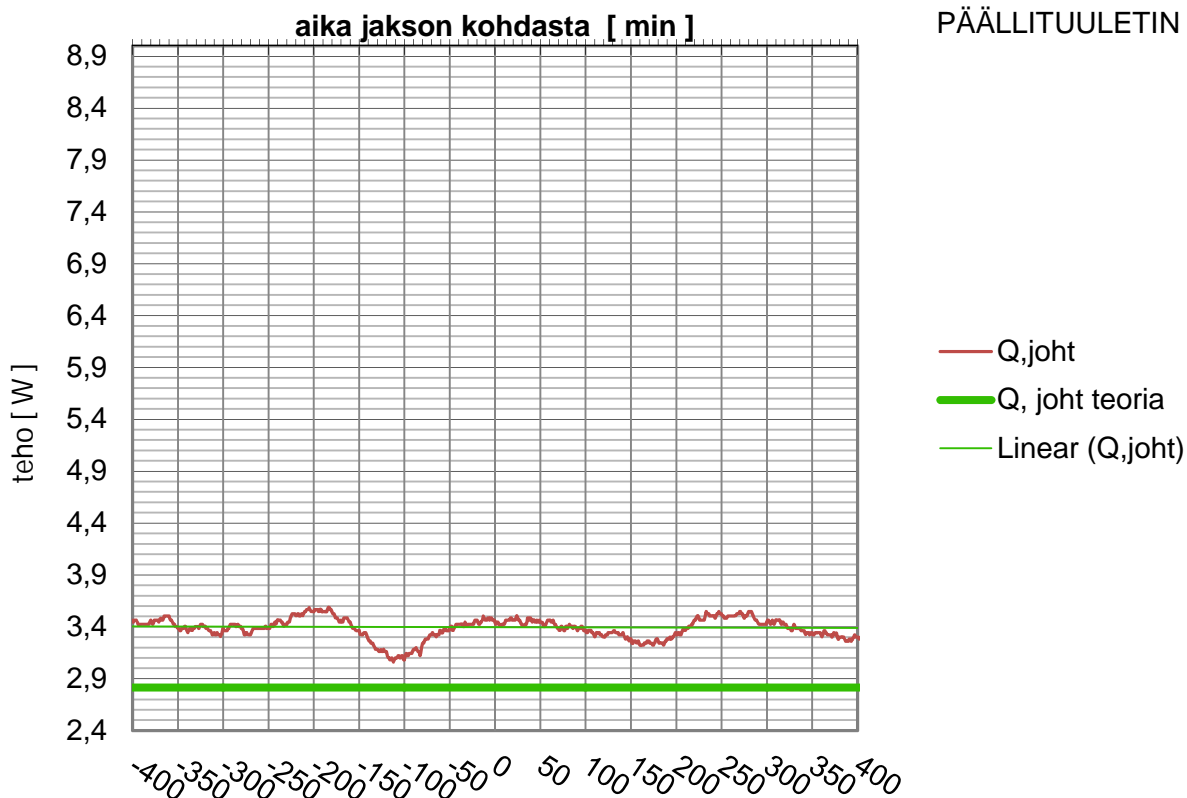
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVY600

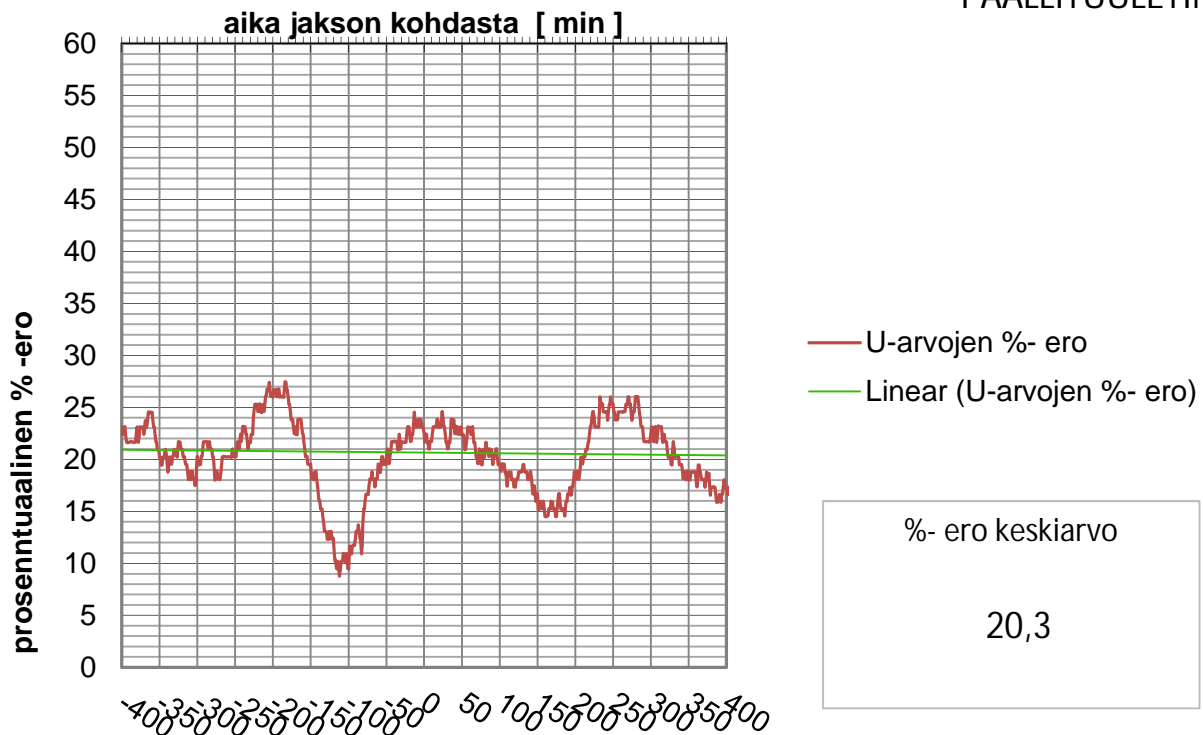
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVY600

PÄÄLLITUULETIN



Nusselt in luku

1,21

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE
TILANNE
AIKA
JAKSO

LEVY600T

STABIILITILA

14.3.2012 2:30

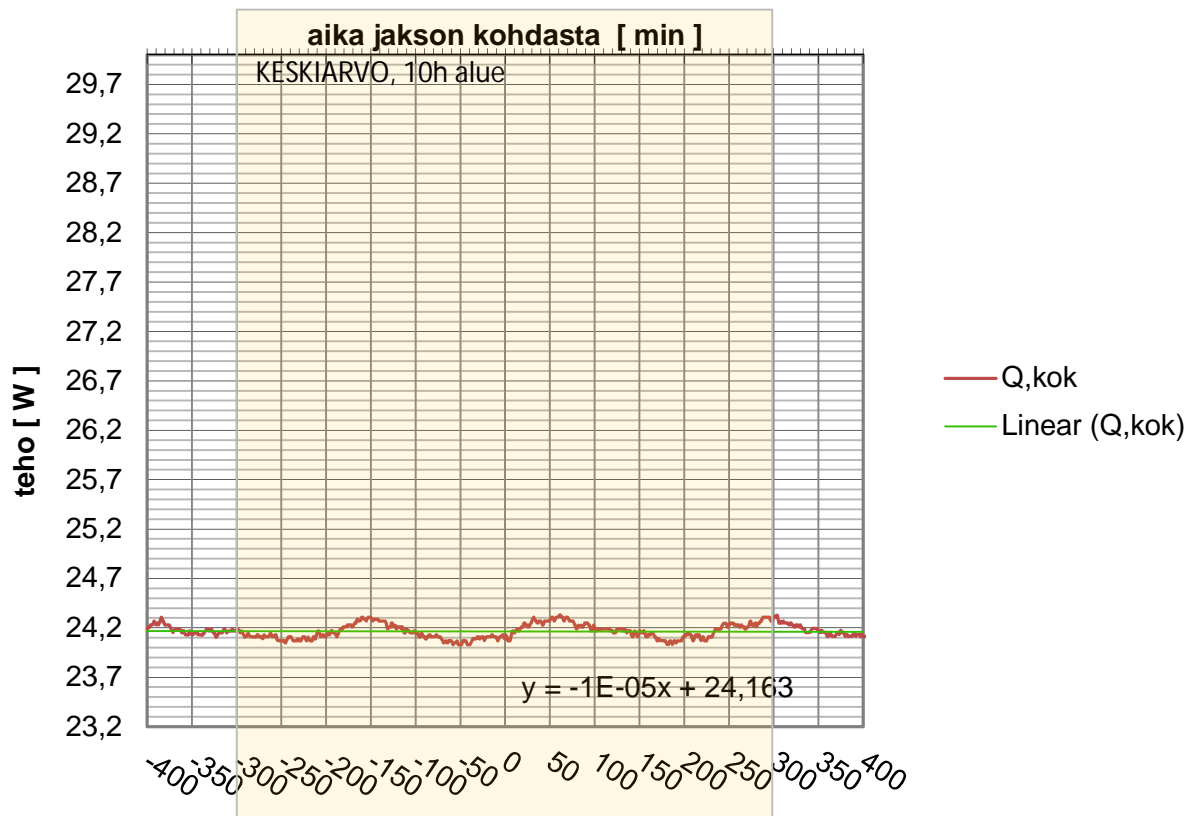
2200

ERISTE ON STATIONÄÄRITILASSA

(keskiarvo +/- 5 tunnin
ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,03	19,92	20,08		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	20,00	19,92	20,07		20,00	
							-0,30
T _{si} [°C]	19,47	19,62	19,89	19,84	19,66	19,69	
T _{si} (KA.) [°C]	19,47	19,62	19,89	19,84	19,66	19,70	
							-34,28
T _{se} [°C]	-14,36	-14,27	-14,18	-14,31	-14,19	-14,26	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,39	-14,30	-14,20	-14,34	-14,21	-14,29	
							-0,44
T _e [°C]	-14,76	-14,64				-14,70	
T _e (KA.) [°C]	-14,79	-14,67				-14,73	
Q, kok [W]	24,07 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,30	
Q, joht [W]	2,67				Q, joht (KA.) [W]	2,74	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

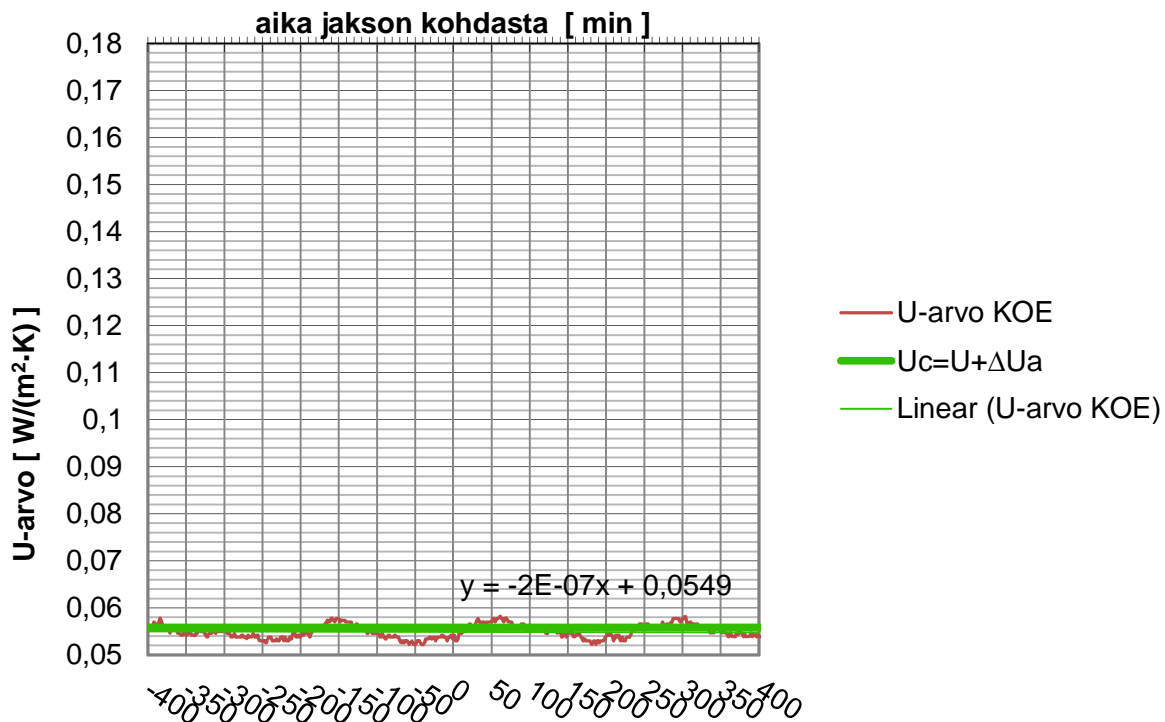


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVY600T

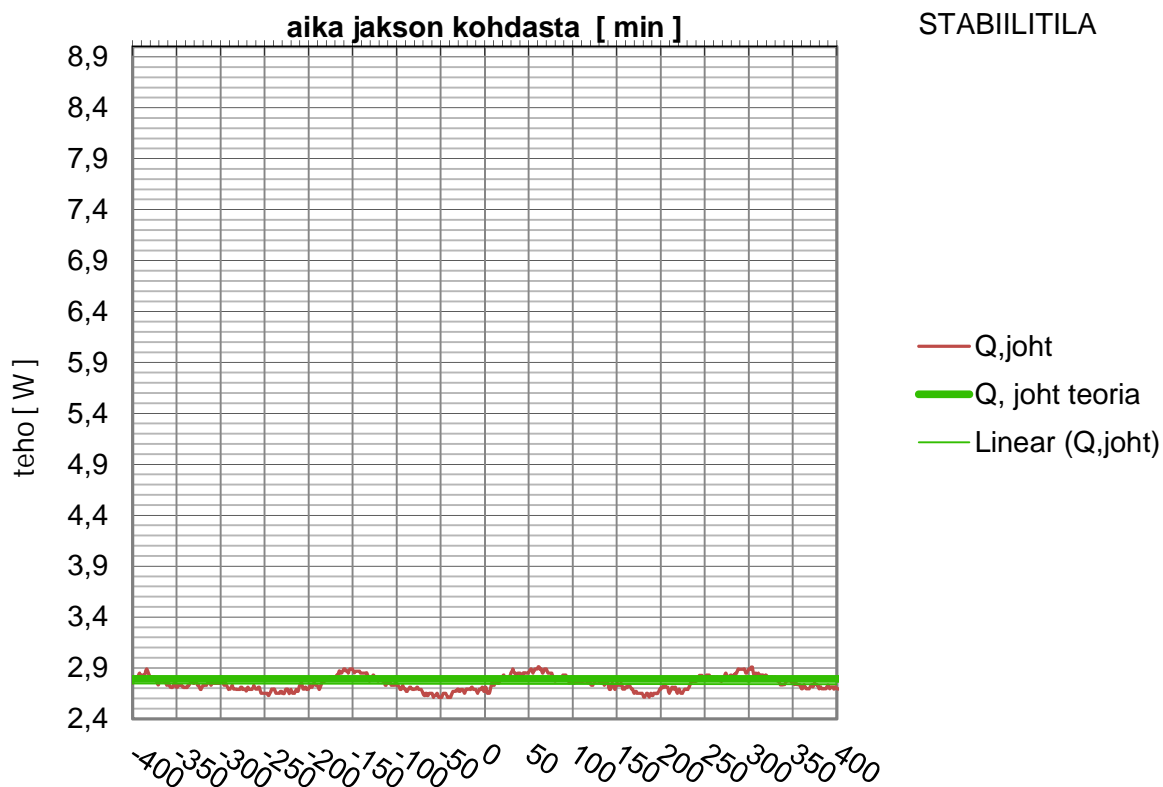
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVY600T

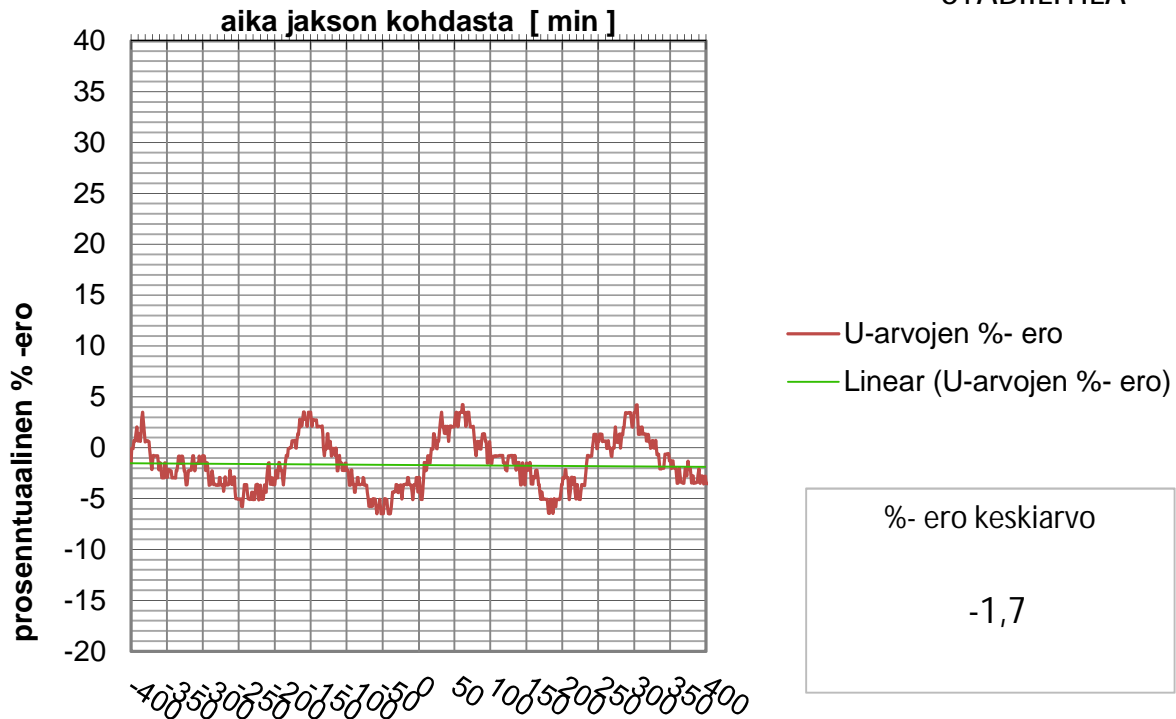
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVY600T

STABIILITILA



Nusseltin luku

1,00

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

KOE

LEVY600T

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

14.3.2012 23:20

JAKSO

3450

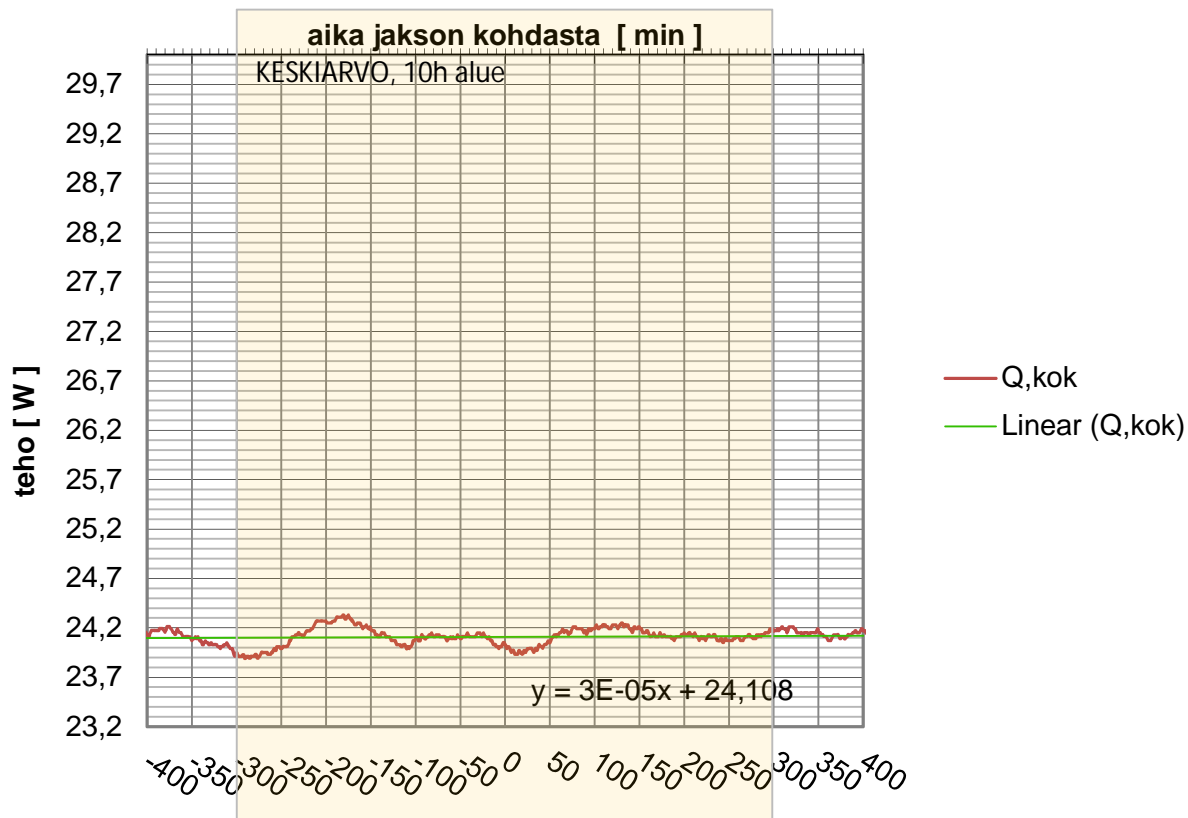
ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIAARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,02	19,92	20,08		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	20,01	19,92	20,07		20,00	
							-0,30
T _{si} [°C]	19,49	19,63	19,89	19,84	19,66	19,70	
T _{si} (KA.) [°C]	19,49	19,63	19,89	19,84	19,66	19,70	
							-34,42
T _{se} [°C]	-14,47	-14,49	-14,32	-14,42	-14,36	-14,41	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,48	-14,50	-14,33	-14,43	-14,37	-14,42	
							-0,52
T _e [°C]	-14,95	-14,93				-14,94	
T _e (KA.) [°C]	-14,95	-14,93				-14,94	
Q, kok [W]	24,01 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,17	
Q, joht [W]	2,70				Q, joht (KA.) [W]	2,78	

KOKONAISLÄMMITYSTEHO

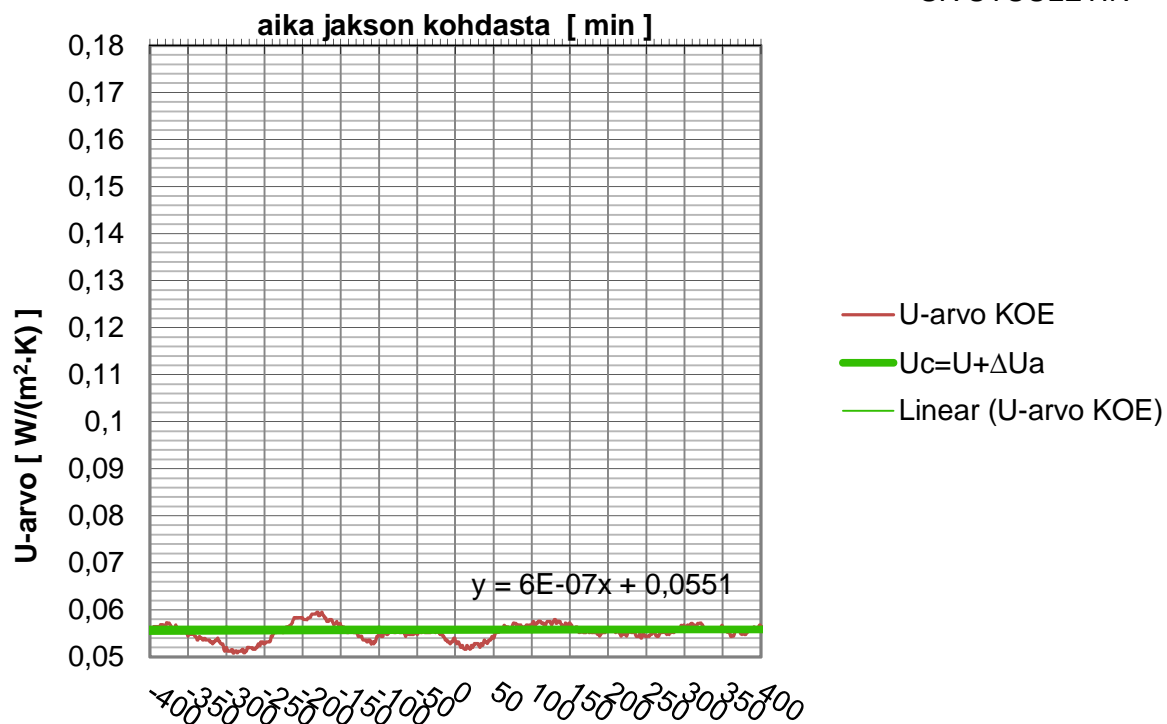


KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVY600T

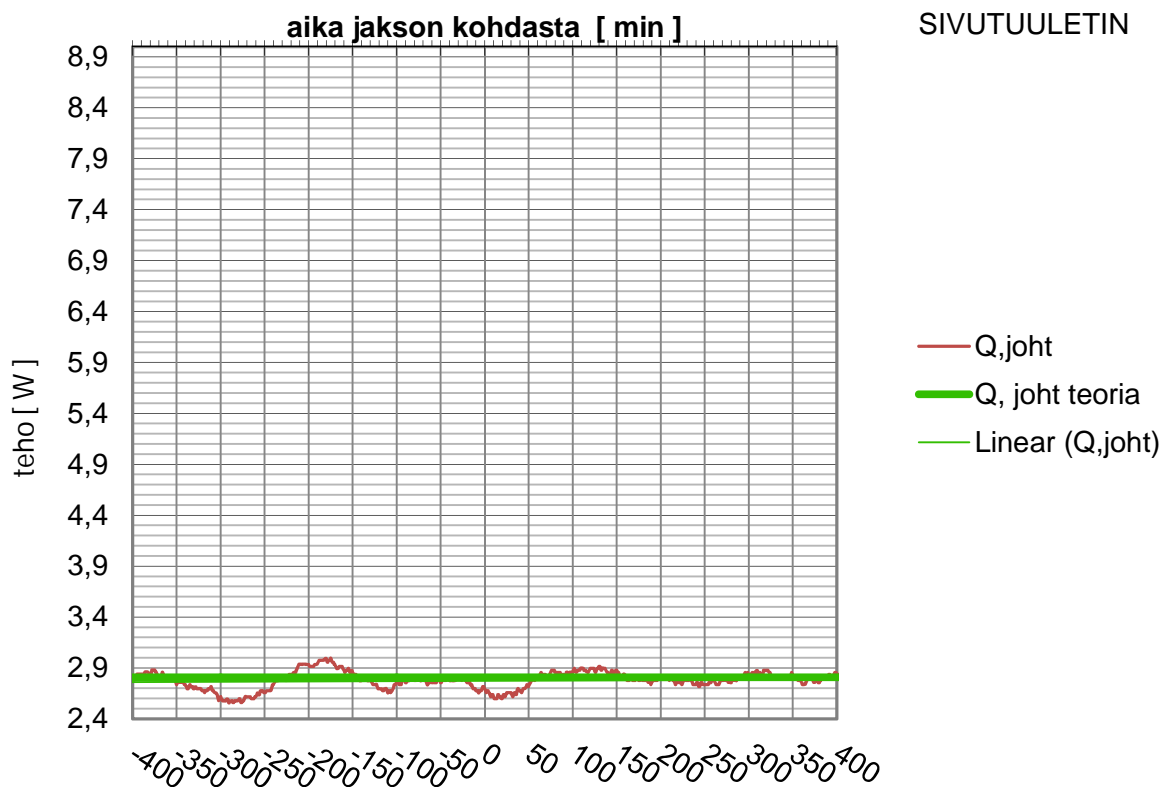
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVY600T

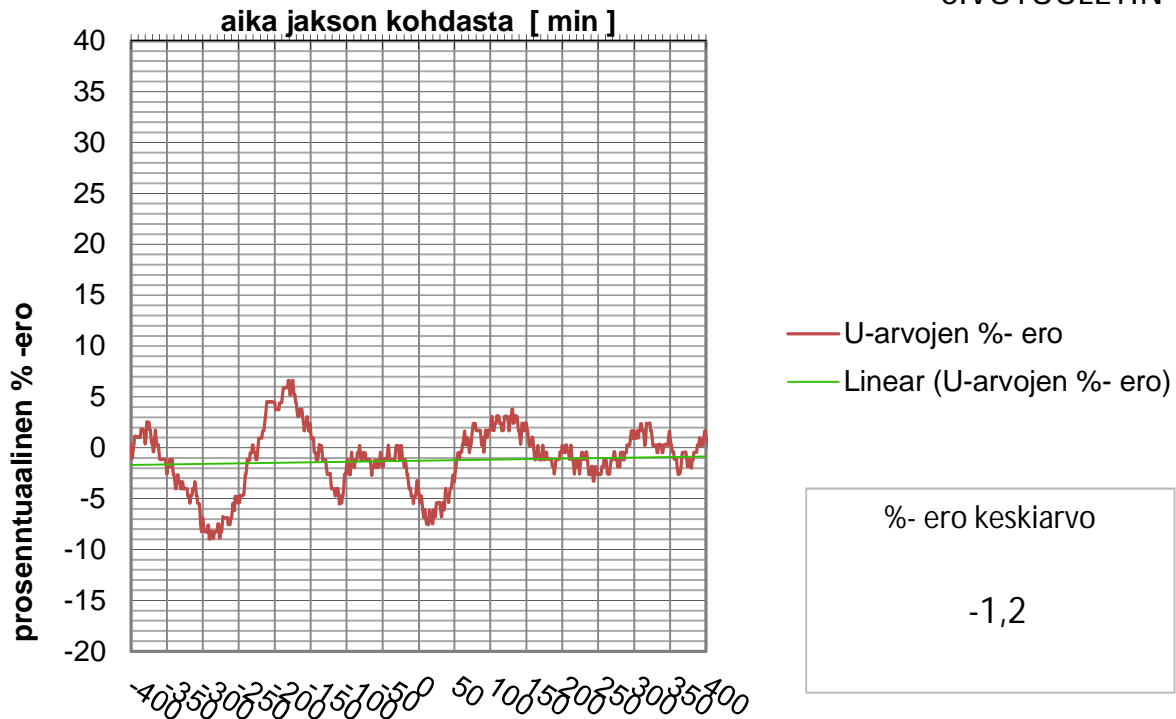
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVY600T

SIVUTUULETIN



Nusseltin luku

1,00

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

KOE

LEVY600T

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAAUS

AIKA

18.3.2012 11:30

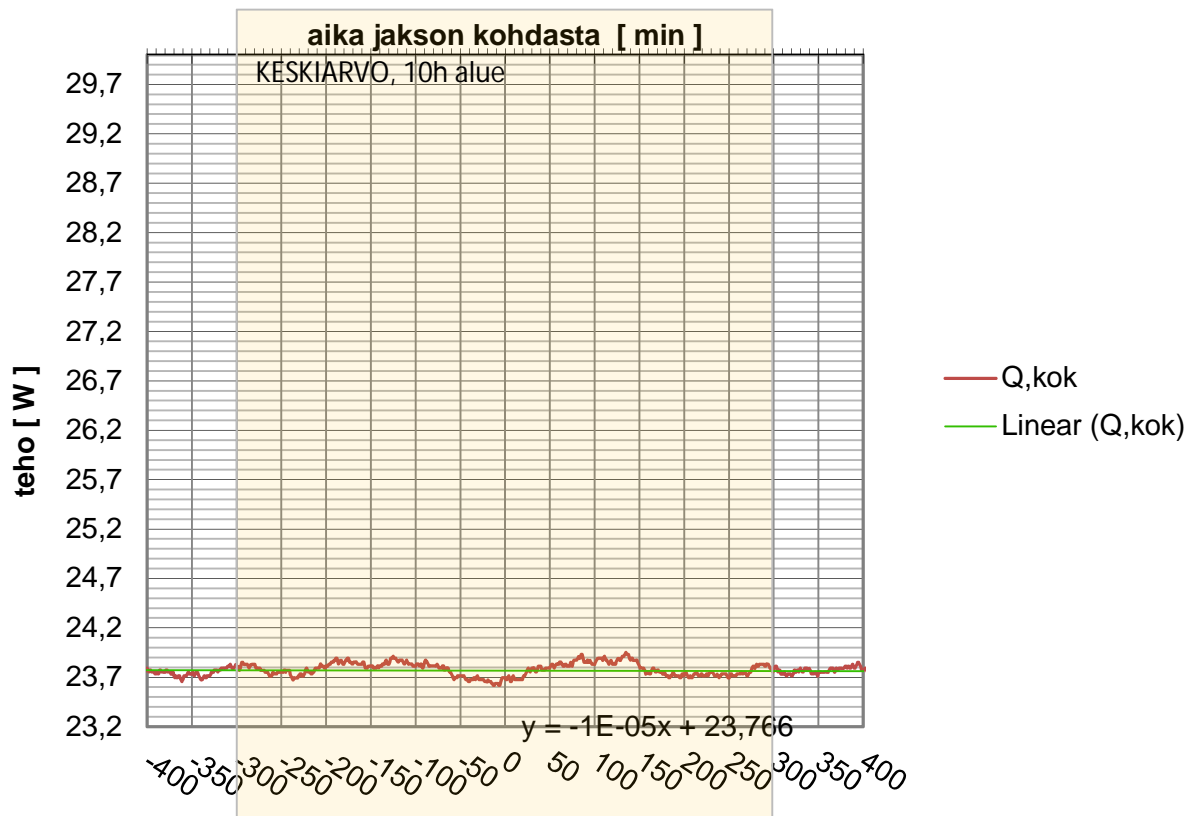
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

8500

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,02	19,92	20,08		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	20,02	19,92	20,08		20,00	
							-0,32
T _{si} [°C]	19,45	19,59	19,88	19,84	19,66	19,69	
T _{si} (KA.) [°C]	19,45	19,59	19,88	19,84	19,66	19,69	
							-34,50
T _{se} [°C]	-14,58	-14,53	-14,38	-14,50	-14,48	-14,50	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,59	-14,54	-14,39	-14,50	-14,48	-14,50	
							-0,55
T _e [°C]	-15,04	-15,07				-15,05	
T _e (KA.) [°C]	-15,03	-15,07				-15,05	
Q, kok [W]	23,70 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	23,79	
Q, joht [W]	2,25				Q, joht (KA.) [W]	2,34	

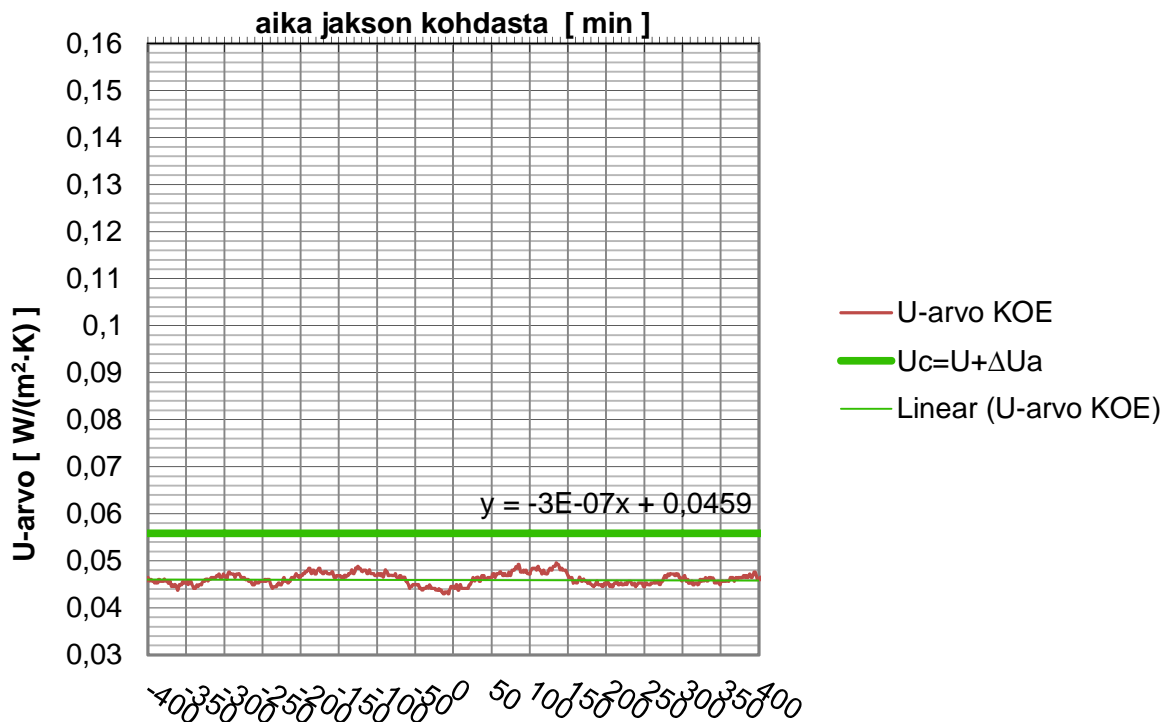
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVY600T

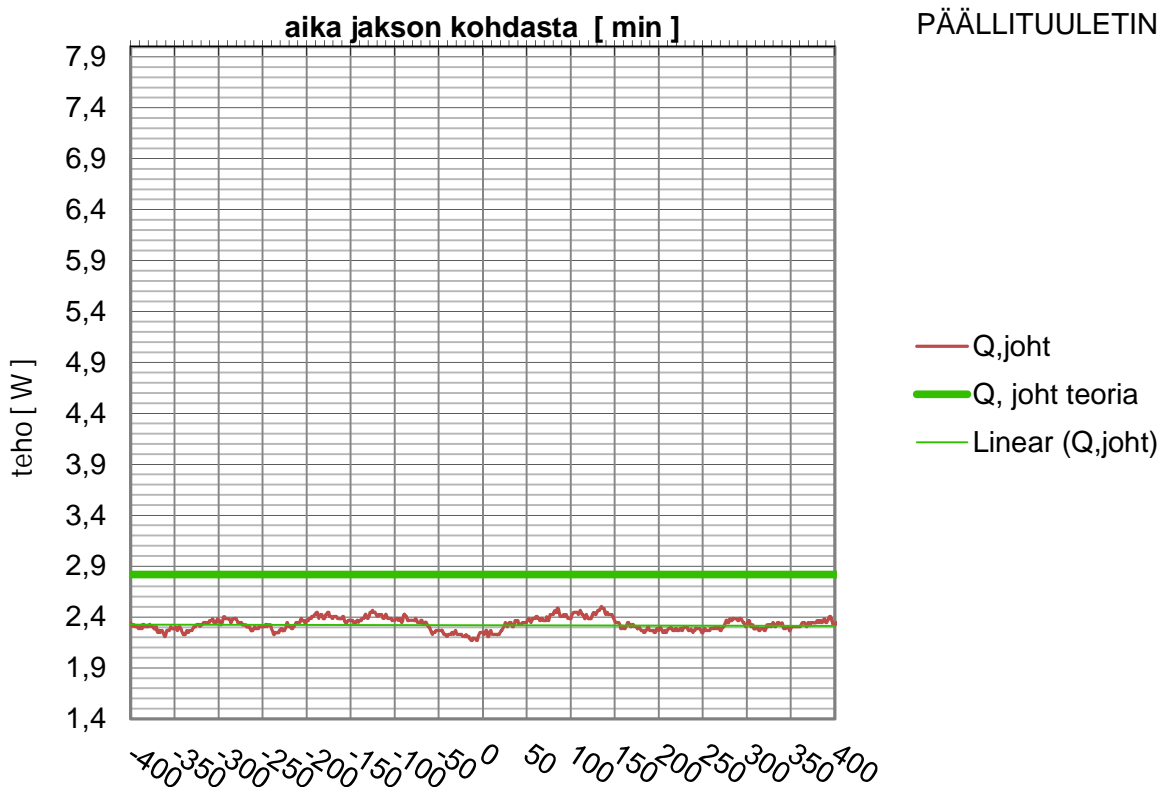
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVY600T

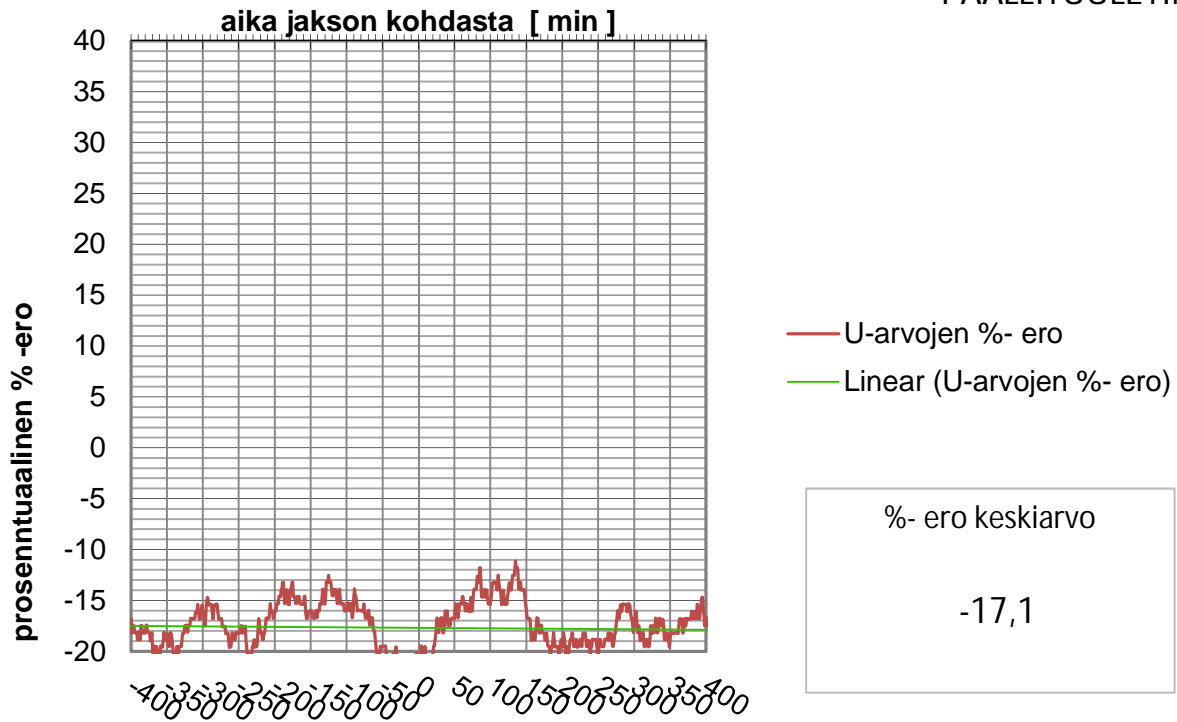
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVY600T

PÄÄLLITUULETIN



Nusseltin luku

0,84

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona. Tällöin ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen ilmanvirtauksen vaikuttaessa eliminoiduu.

KOE

LEVYPUH600

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

30.3.2012 5:31

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

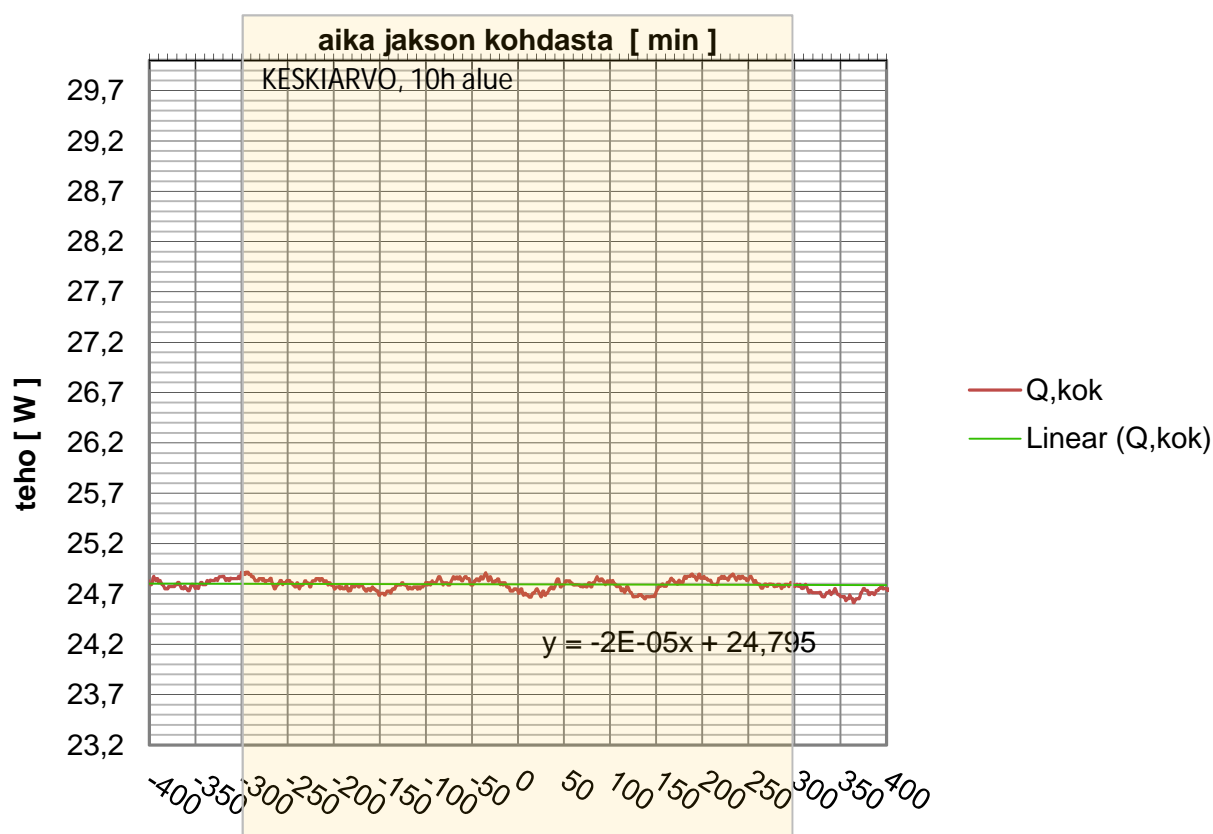
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

5075

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIVARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,01	19,93	20,09		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	19,99	19,93	20,08		20,00	
							-0,37
T _{si} [°C]	19,39	19,46	19,85	19,82	19,64	19,63	
T _{si} (KA.) [°C]	19,39	19,46	19,85	19,83	19,64	19,63	
							-34,15
T _{se} [°C]	-14,17	-14,28	-14,03	-14,03	-14,04	-14,11	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,21	-14,32	-14,08	-14,08	-14,07	-14,15	
							-0,67
T _e [°C]	-14,85	-14,67				-14,76	
T _e (KA.) [°C]	-14,91	-14,74				-14,82	
Q, kok [W]	24,75 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,79	
Q, joht [W]	3,31				Q, joht (KA.) [W]	3,38	

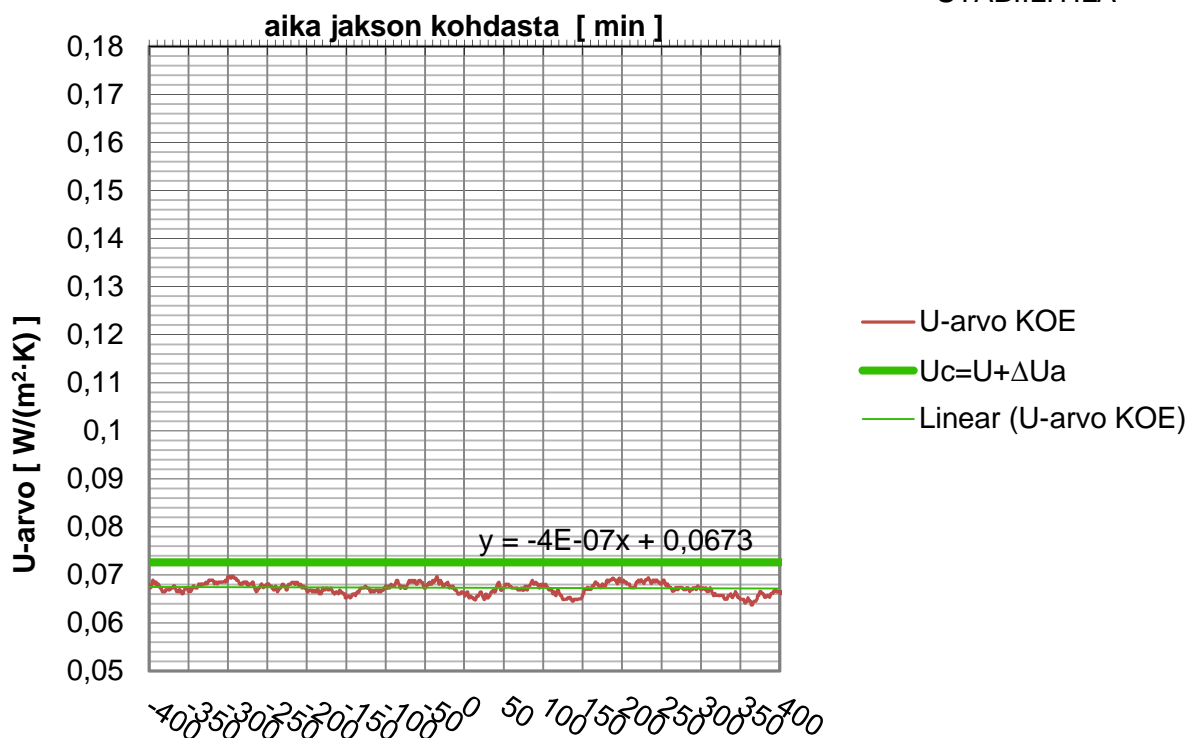
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVYPUH600

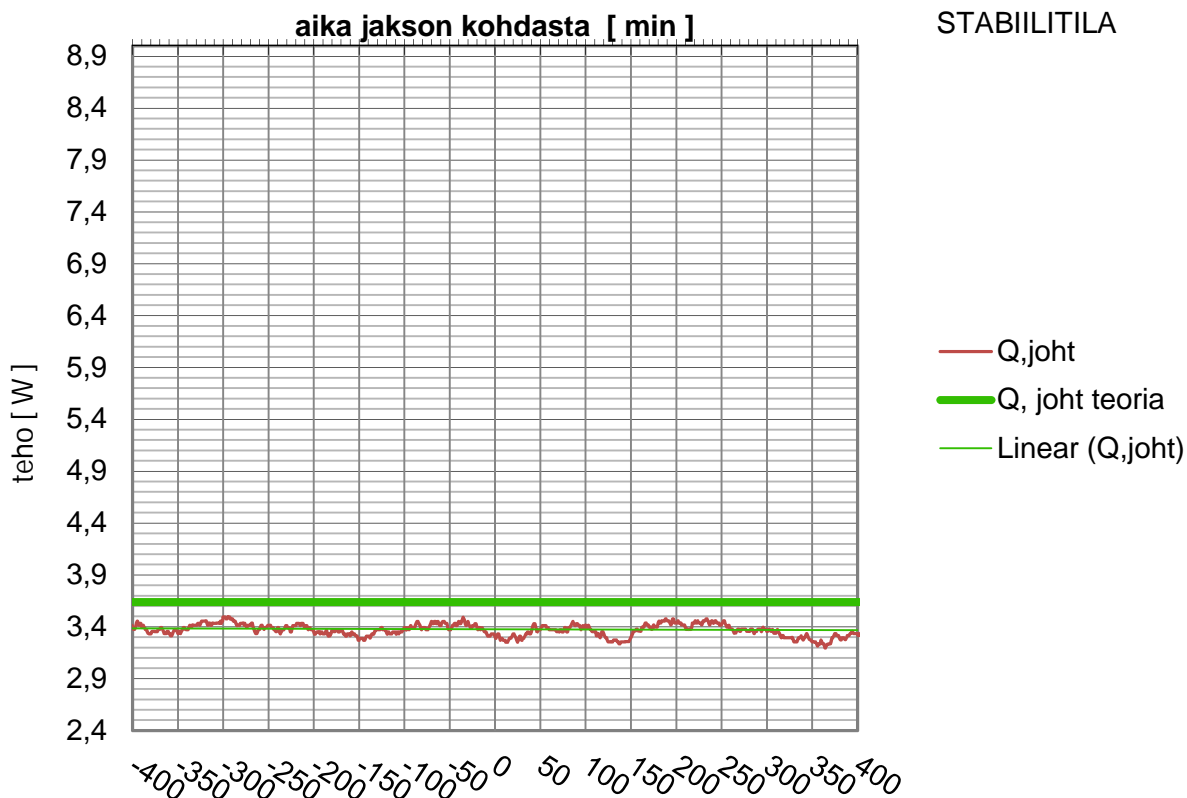
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVYPUH600

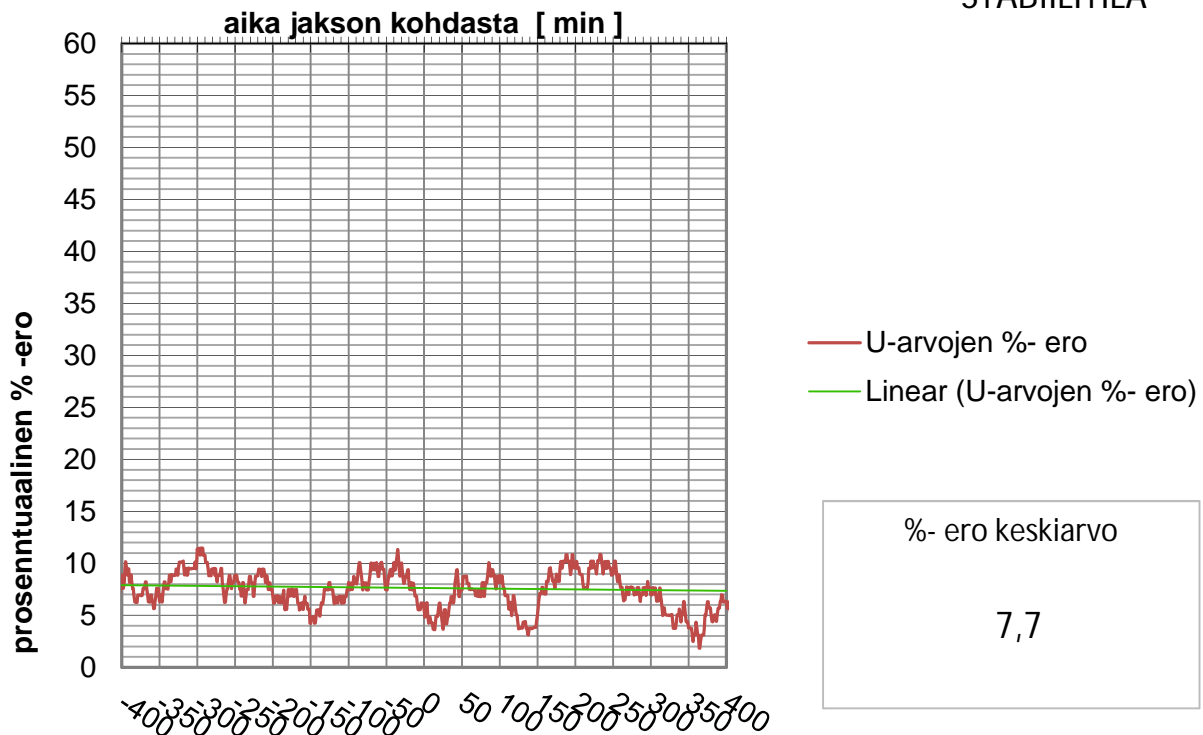
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVYPUH600

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,10

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVYPUH600

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

1.4.2012 0:51

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAAUS

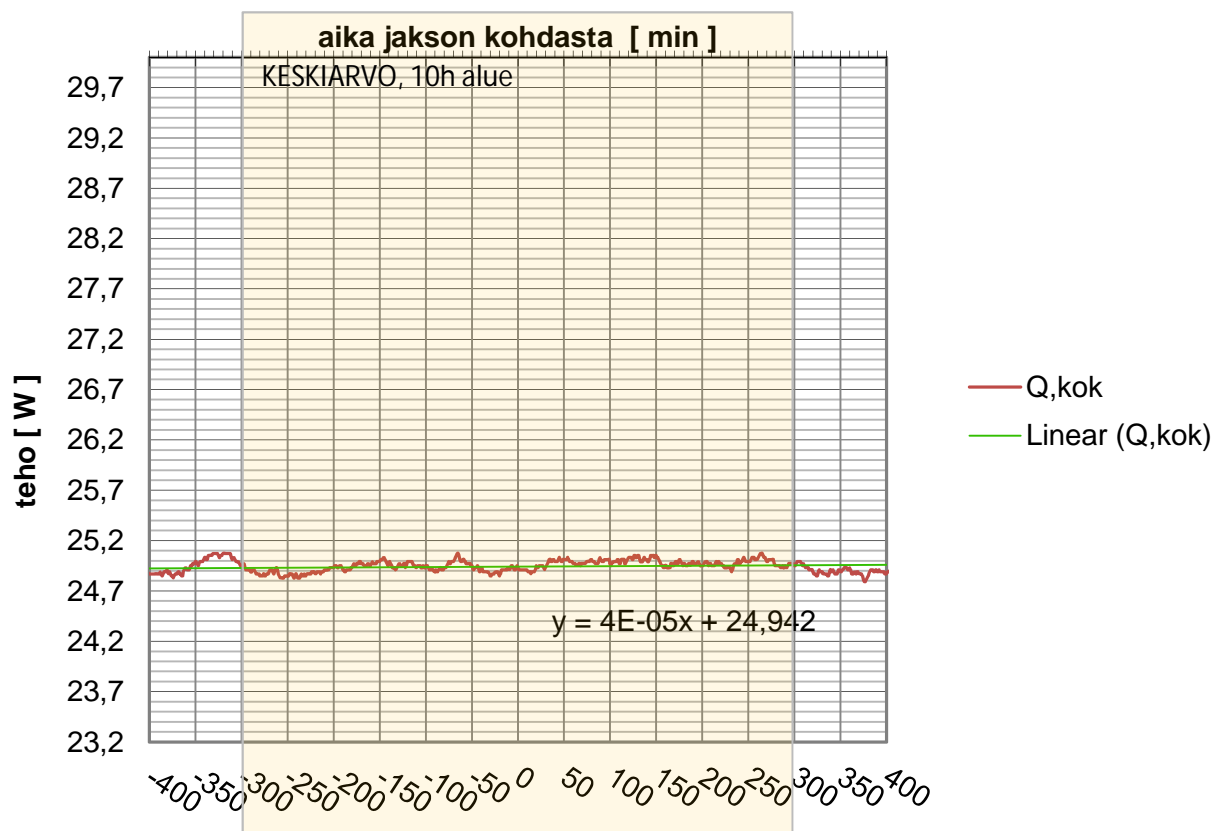
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

7675

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	19,98	20,04	19,91	20,07		20,00	
T,i (KA.) [°C]	19,99	20,03	19,92	20,07		20,00	
							-0,35
T,si [°C]	19,43	19,49	19,91	19,82	19,58	19,65	
T,si (KA.) [°C]	19,43	19,50	19,90	19,82	19,58	19,65	
							-33,98
T,se [°C]	-14,32	-14,56	-13,91	-13,71	-13,32	-13,97	
T,se (KA.) [°C]	-14,34	-14,59	-13,92	-13,72	-13,31	-13,98	
							-0,85
T,e [°C]	-14,85	-14,74				-14,80	
T,e (KA.) [°C]	-14,88	-14,78				-14,83	
Q, kok [W]	24,91 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	24,97	
Q, joht [W]	3,60				Q, joht (KA.) [W]	3,62	

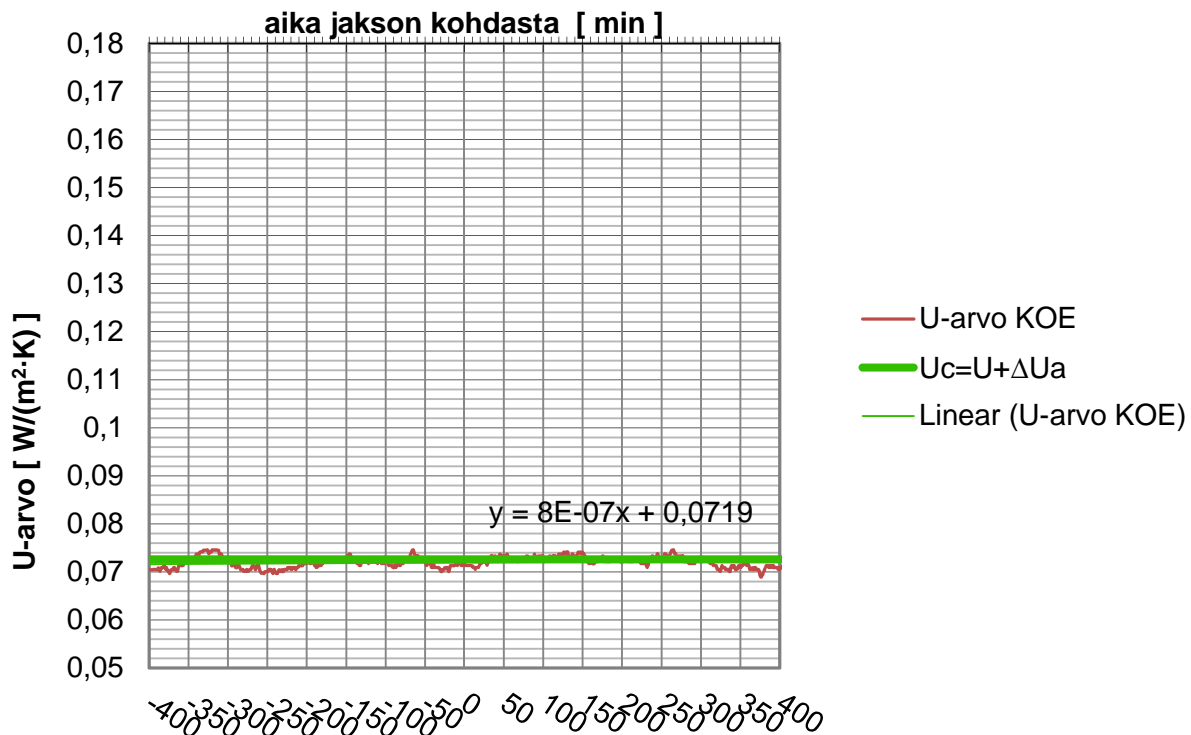
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

LEVYPUH600

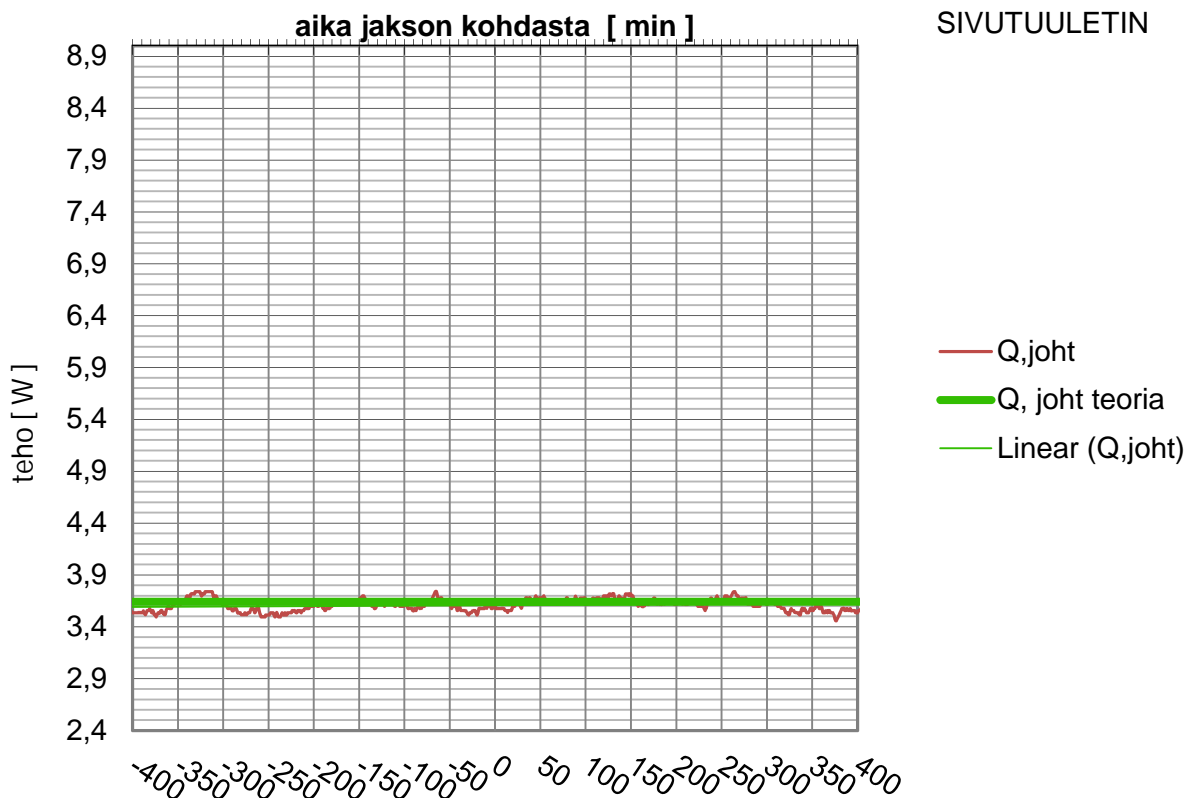
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVYPUH600

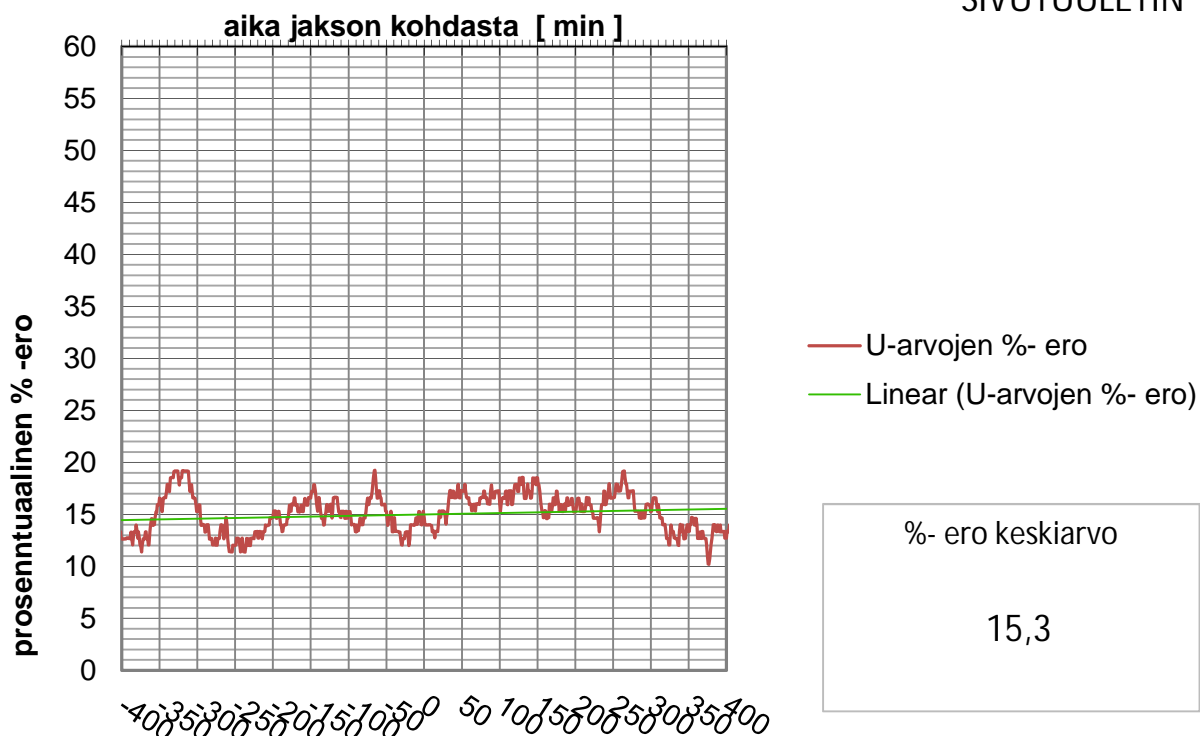
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVYPUH600

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,18

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVYPUH600

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

AIKA

4.4.2012 10:06

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

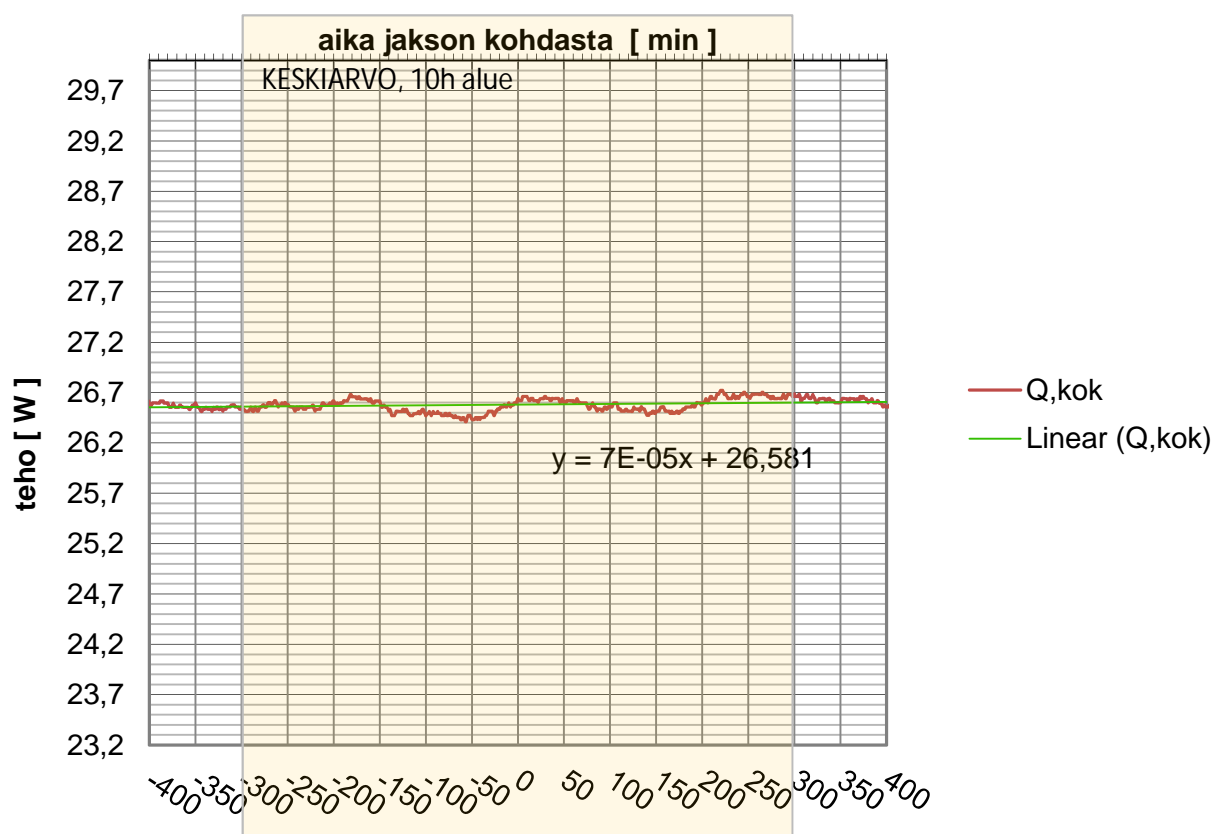
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

12550

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	19,97	19,89	20,02	20,09		19,99	
T,i (KA.) [°C]	19,97	19,90	20,02	20,10		20,00	-0,50
T,si [°C]	19,37	19,36	19,33	19,75	19,68	19,50	
T,si (KA.) [°C]	19,37	19,36	19,33	19,75	19,68	19,50	-34,72
T,se [°C]	-14,75	-14,60	-14,66	-14,70	-14,74	-14,69	
T,se (KA.) [°C]	-14,78	-14,63	-14,69	-14,73	-14,77	-14,72	-0,23
T,e [°C]	-14,89	-14,91				-14,90	
T,e (KA.) [°C]	-14,93	-14,97				-14,95	
Q, kok [W]	26,62 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	26,67	
Q, joht [W]	5,20				Q, joht (KA.) [W]	5,12	

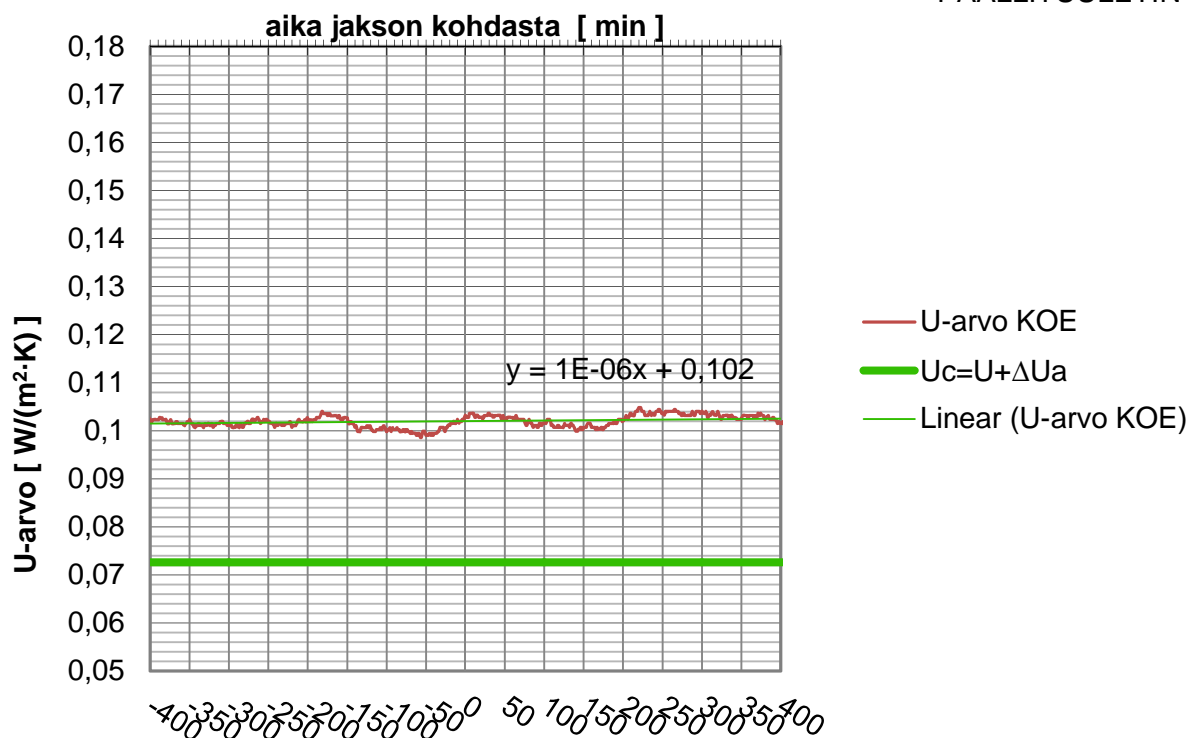
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVYPUH600

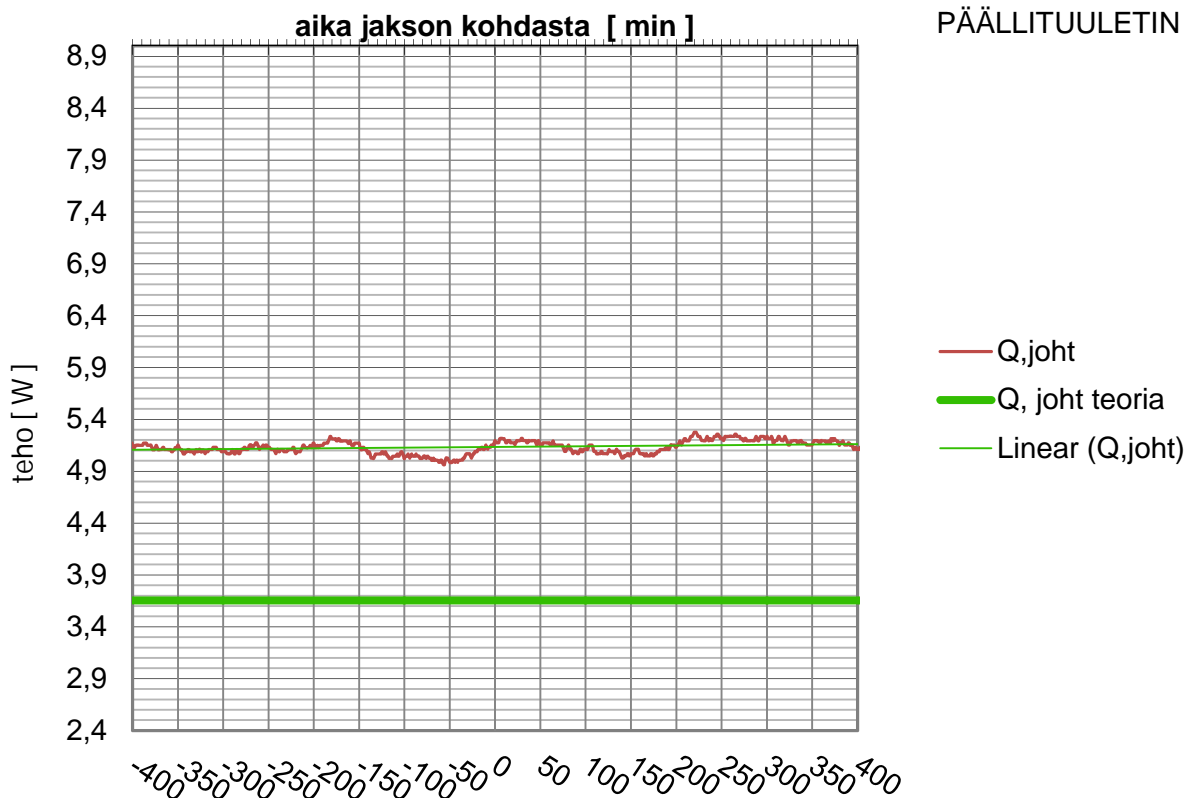
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVYPUH600

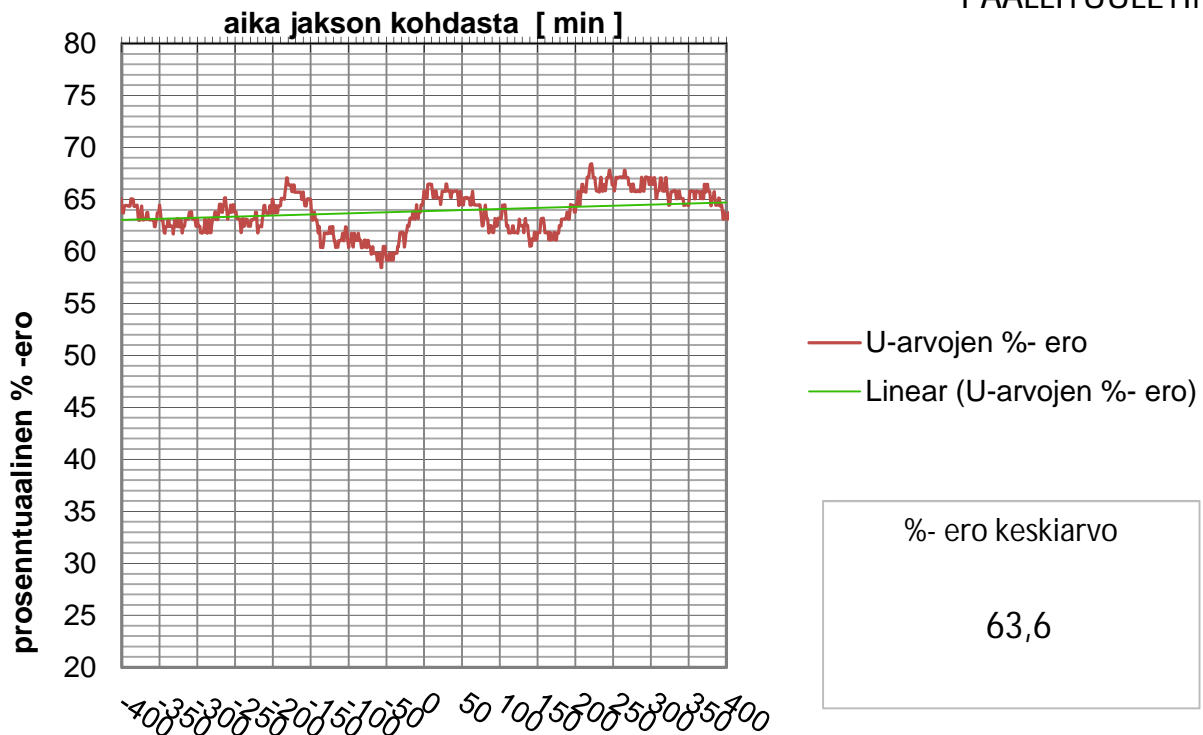
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVYPUH600

PÄÄLLITUULETIN



Nusselt in luku

1,66

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVYPUH600T

TILANNE

STABIILITILA

AIKA

22.3.2012 22:54

ERISTE ON TUULETTAMATTOMASSA TILASSA

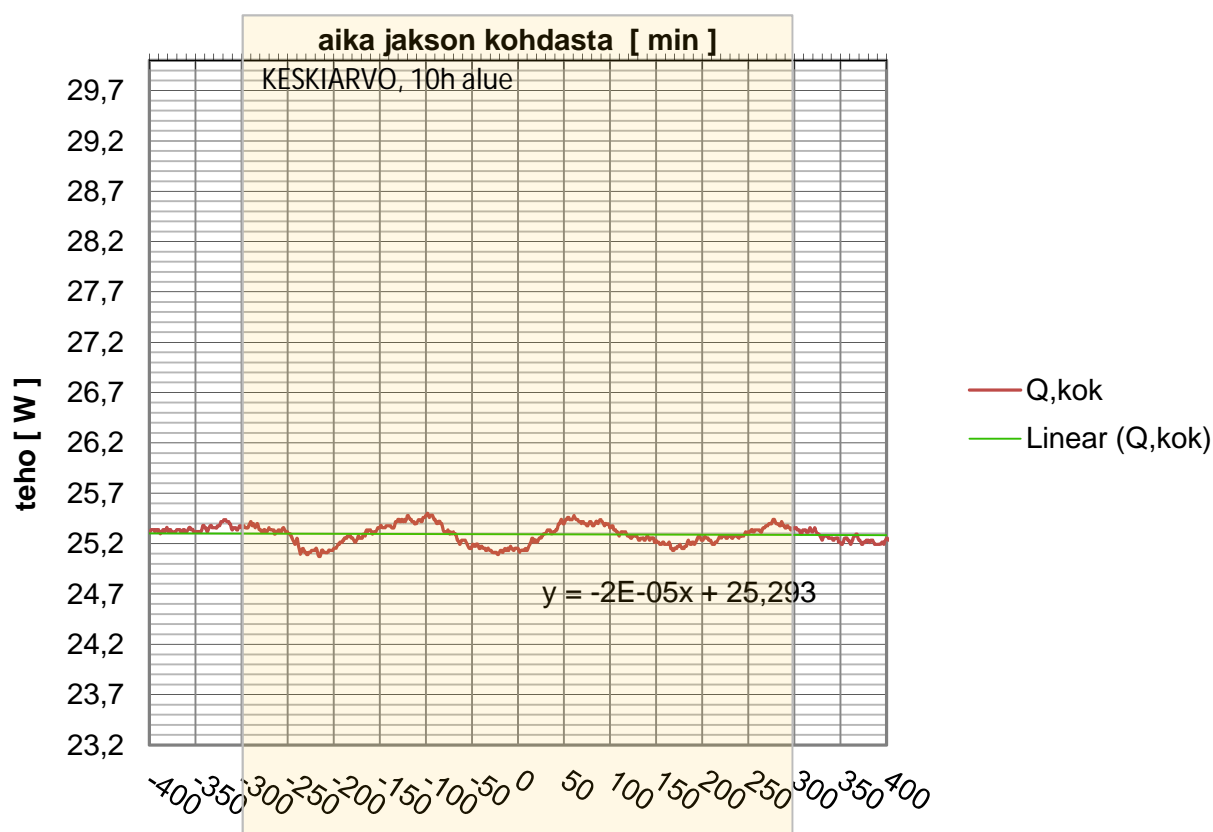
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

4725

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T,i [°C]	19,99	20,02	19,92	20,07		20,00	
T,i (KA.) [°C]	19,99	20,02	19,93	20,07		20,00	
							-0,34
T,si [°C]	19,43	19,55	19,86	19,81	19,63	19,66	
T,si (KA.) [°C]	19,43	19,57	19,86	19,81	19,63	19,66	
							-33,83
T,se [°C]	-13,59	-14,01	-13,80	-13,89	-13,83	-13,82	
T,se (KA.) [°C]	-13,58	-14,02	-13,80	-13,90	-13,84	-13,83	
							-1,08
T,e [°C]	-14,94	-14,89				-14,92	
T,e (KA.) [°C]	-14,95	-14,87				-14,91	
Q, kok [W]	25,13 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,35	
Q, joht [W]	3,73				Q, joht (KA.) [W]	3,87	

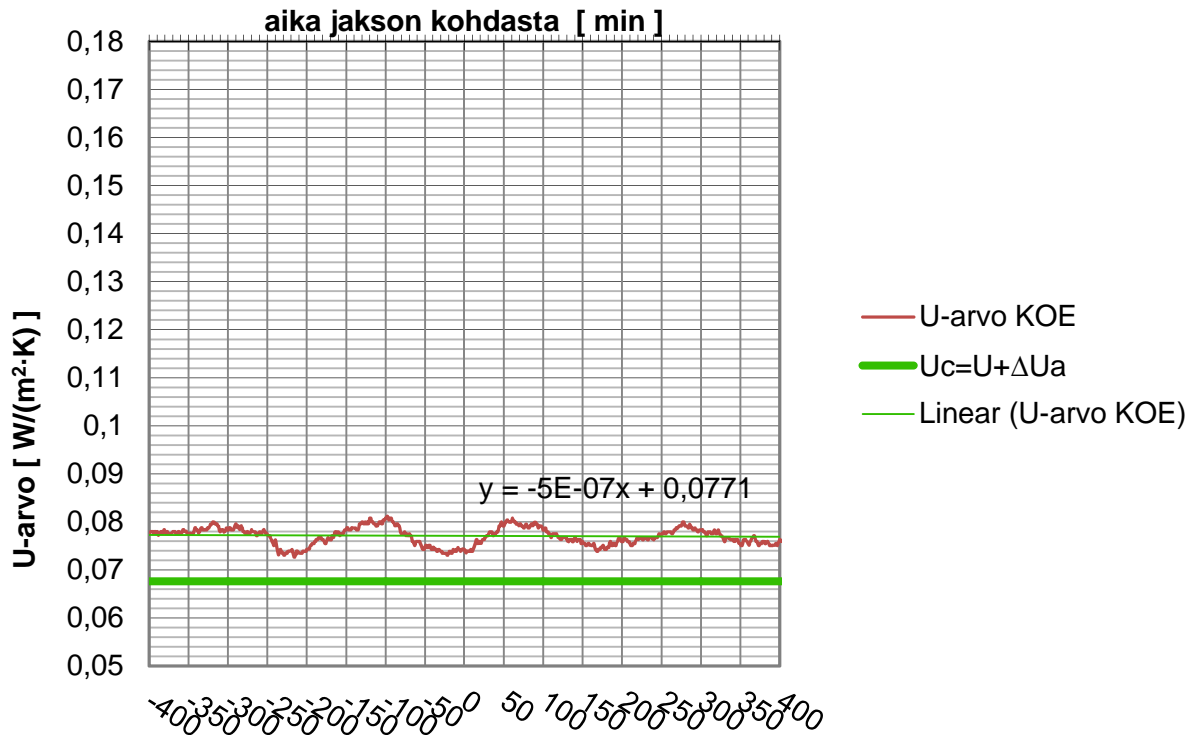
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

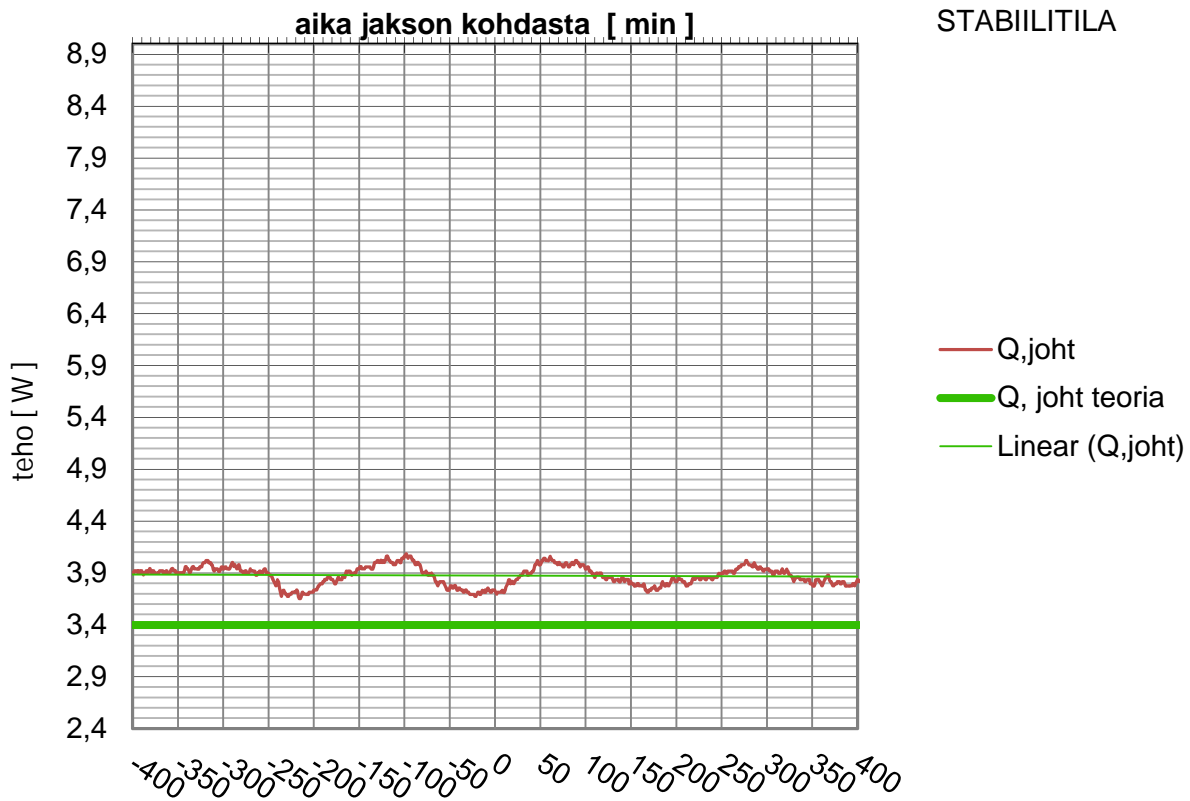
LEVYPUH600T

STABIILITILA

**KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO**

LEVYPUH600T

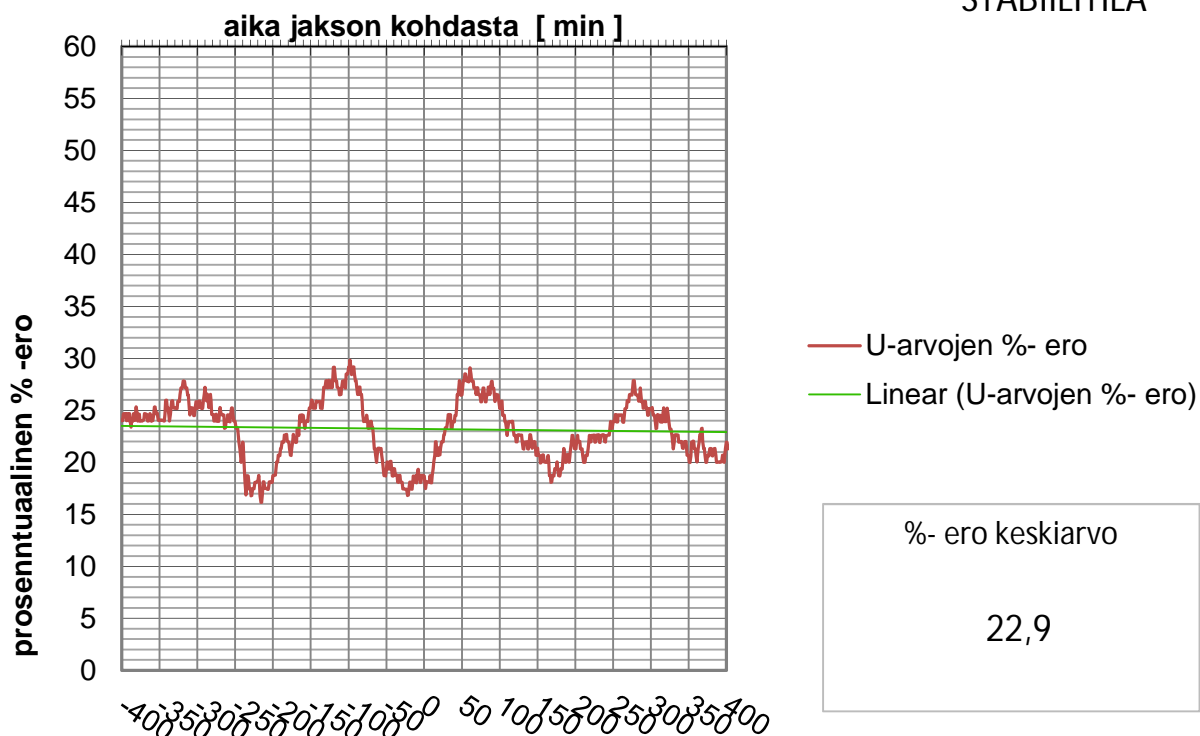
STABIILITILA



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVYPUH600T

STABIILITILA



Nusselt in luku

1,27

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVYPUH600T

TILANNE

SIVUTUULETIN

AIKA

24.3.2012 0:44

JAKSO

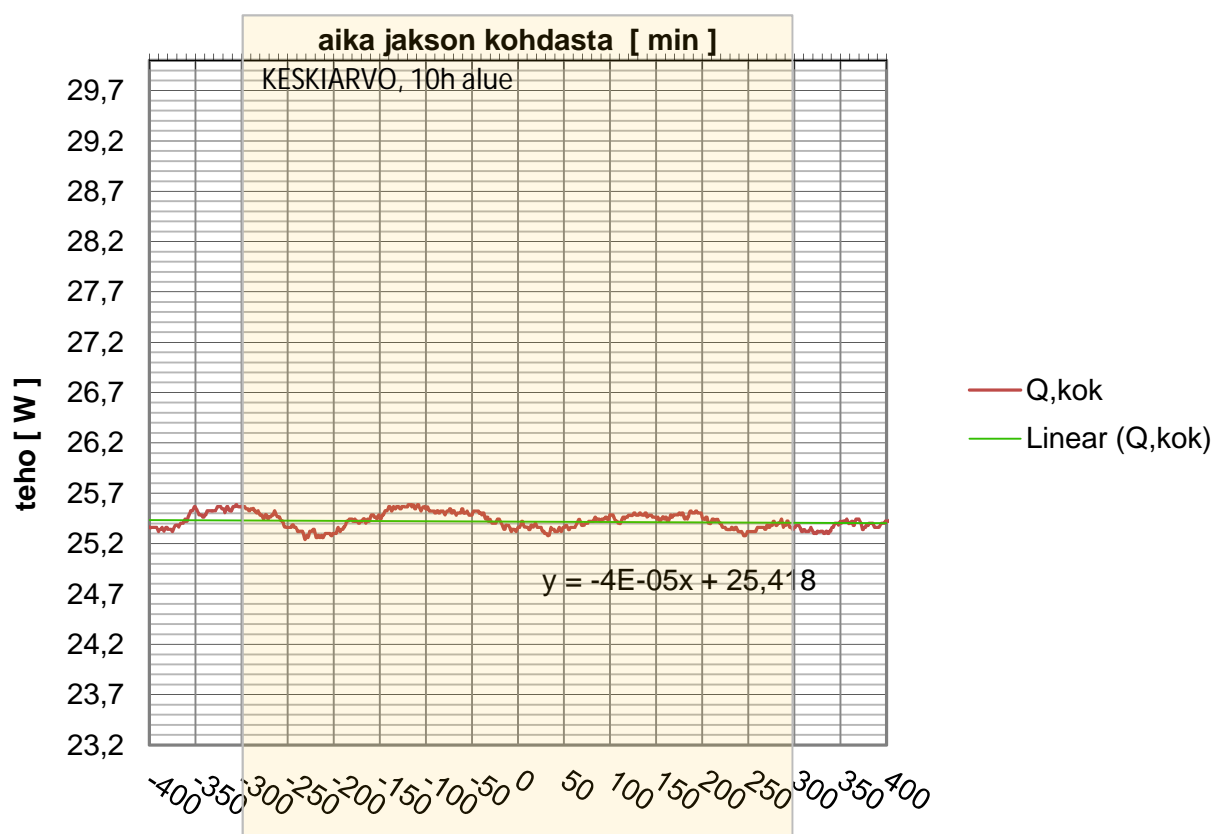
6275

ERISTEEN PINNALLA LAMINAARINEN ILMAN VIRTAUS

(keskiarvo +/- 5 tunnin

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIVARVO	ERO
T _i [°C]	19,99	20,00	19,93	20,07		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,99	20,00	19,93	20,07		20,00	
							-0,33
T _{si} [°C]	19,44	19,59	19,86	19,81	19,63	19,67	
T _{si} (KA.) [°C]	19,44	19,58	19,86	19,81	19,63	19,67	
							-33,81
T _{se} [°C]	-13,55	-14,02	-13,78	-13,90	-13,83	-13,82	
T _{se} (KA.) [°C]	-13,55	-14,02	-13,78	-13,90	-13,83	-13,82	
							-1,10
T _e [°C]	-14,95	-14,87				-14,91	
T _e (KA.) [°C]	-14,96	-14,87				-14,91	
Q, kok [W]	25,38 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,36	
Q, joht [W]	4,03				Q, joht (KA.) [W]	4,09	

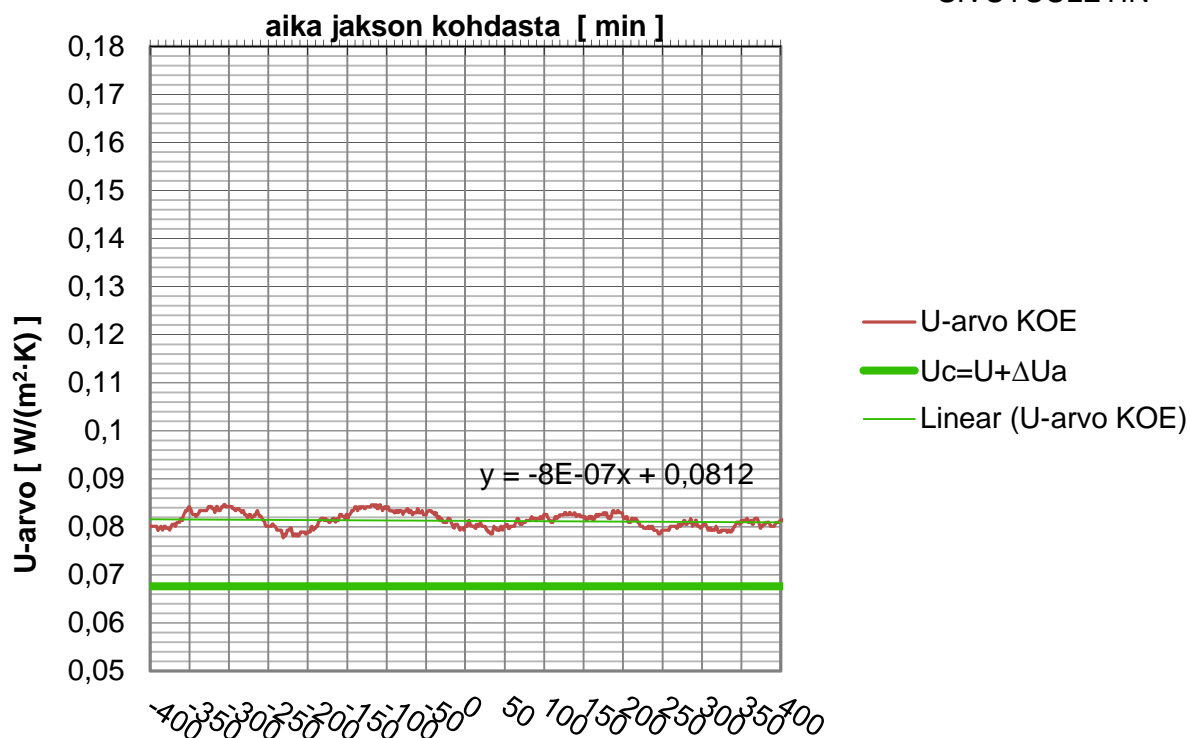
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$$U_c = U + \Delta U; \Delta U = \Delta U_a$$

LEVYPUH600T

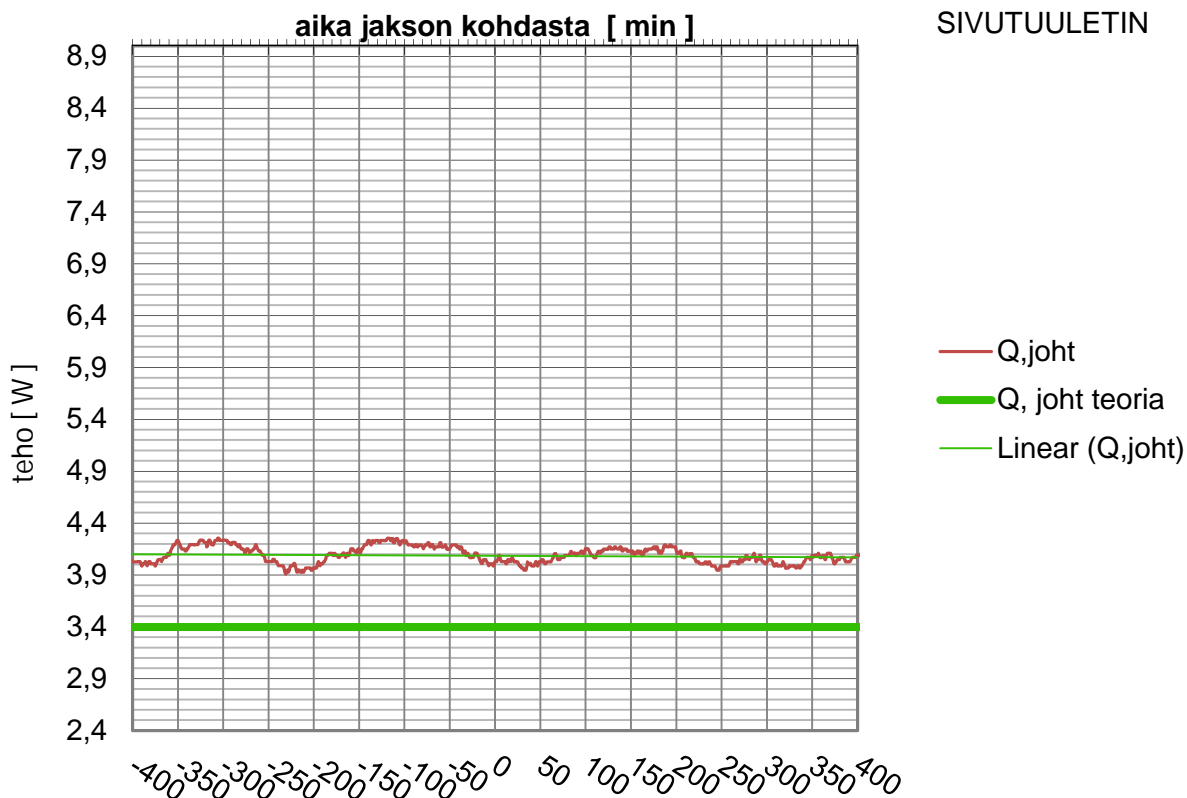
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVYPUH600T

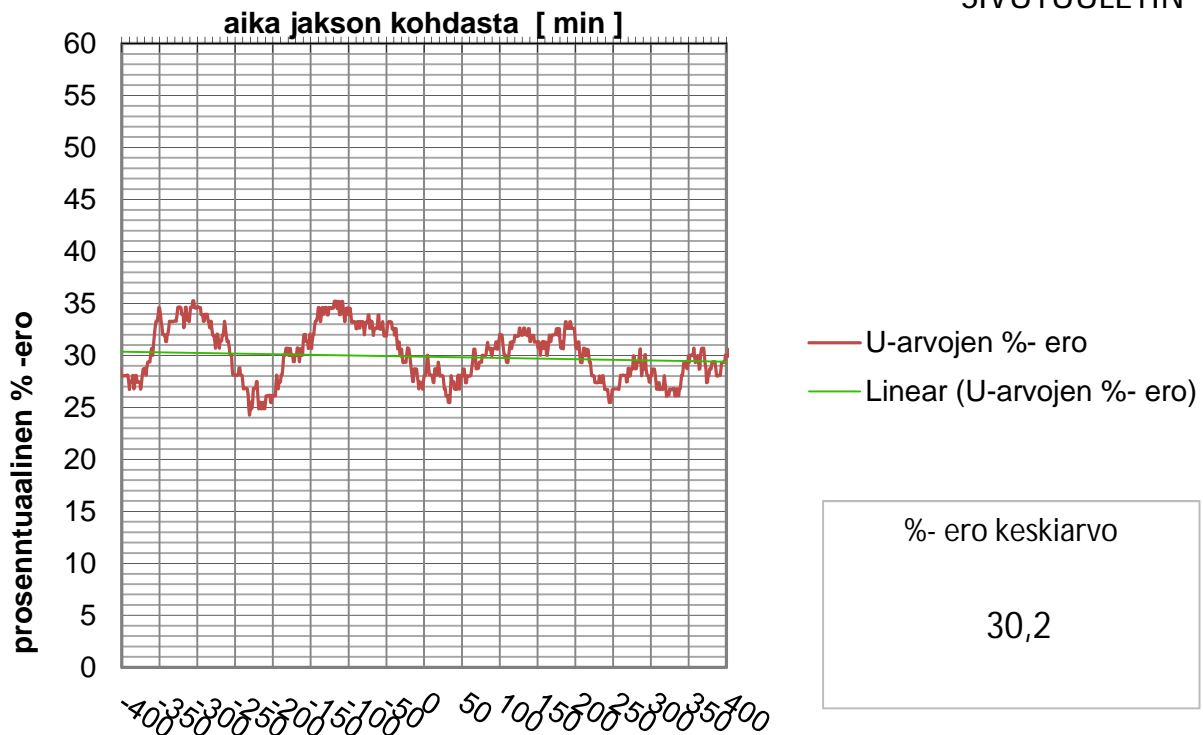
SIVUTUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO
prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVYPUH600T

SIVUTUULETIN



Nusselt in luku

1,35

Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.

KOE

LEVYPUH600T

TILANNE

PÄÄLLITUULETIN

AIKA

26.3.2012 4:24

ERISTEEN PINNALLA TURBULENTTINEN ILMAN VIRTAUS

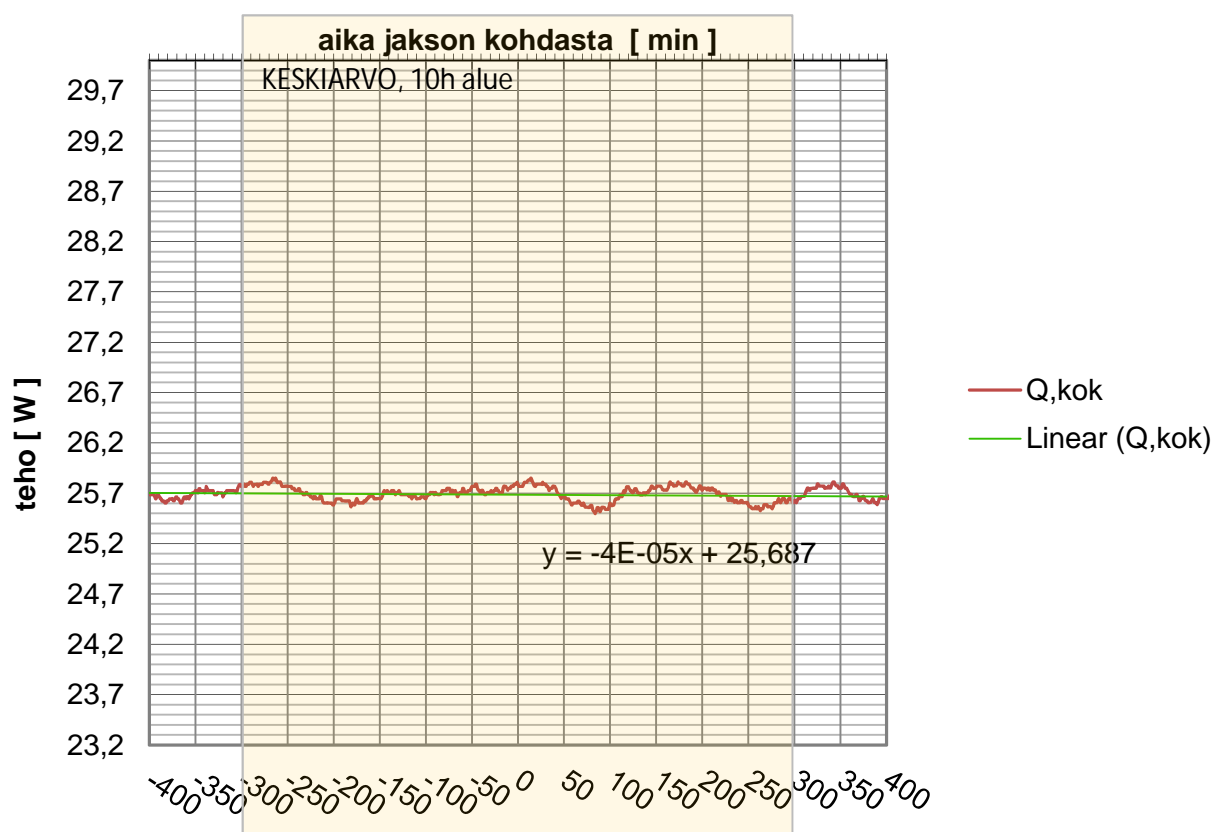
(keskiarvo +/- 5 tunnin

JAKSO

9375

ajalta mol puolin jaksoa)

	MP 01	MP 02	MP 03	MP 04	MP 05	KESKIARVO	ERO
T _i [°C]	19,98	20,00	19,94	20,10		20,00	
T _i (KA.) [°C]	19,98	19,99	19,94	20,08		20,00	
							-0,39
T _{si} [°C]	19,37	19,36	19,81	19,84	19,67	19,61	
T _{si} (KA.) [°C]	19,36	19,36	19,81	19,84	19,67	19,61	
							-33,92
T _{se} [°C]	-14,03	-13,84	-14,00	-13,68	-14,11	-13,94	
T _{se} (KA.) [°C]	-14,02	-13,83	-13,99	-13,67	-14,10	-13,92	
							-1,05
T _e [°C]	-14,96	-14,97				-14,96	
T _e (KA.) [°C]	-14,97	-14,98				-14,97	
Q, kok [W]	25,77 (jakson kohta)				Q, kok (KA.) [W]	25,62	
Q, joht [W]	4,34				Q, joht (KA.) [W]	4,25	

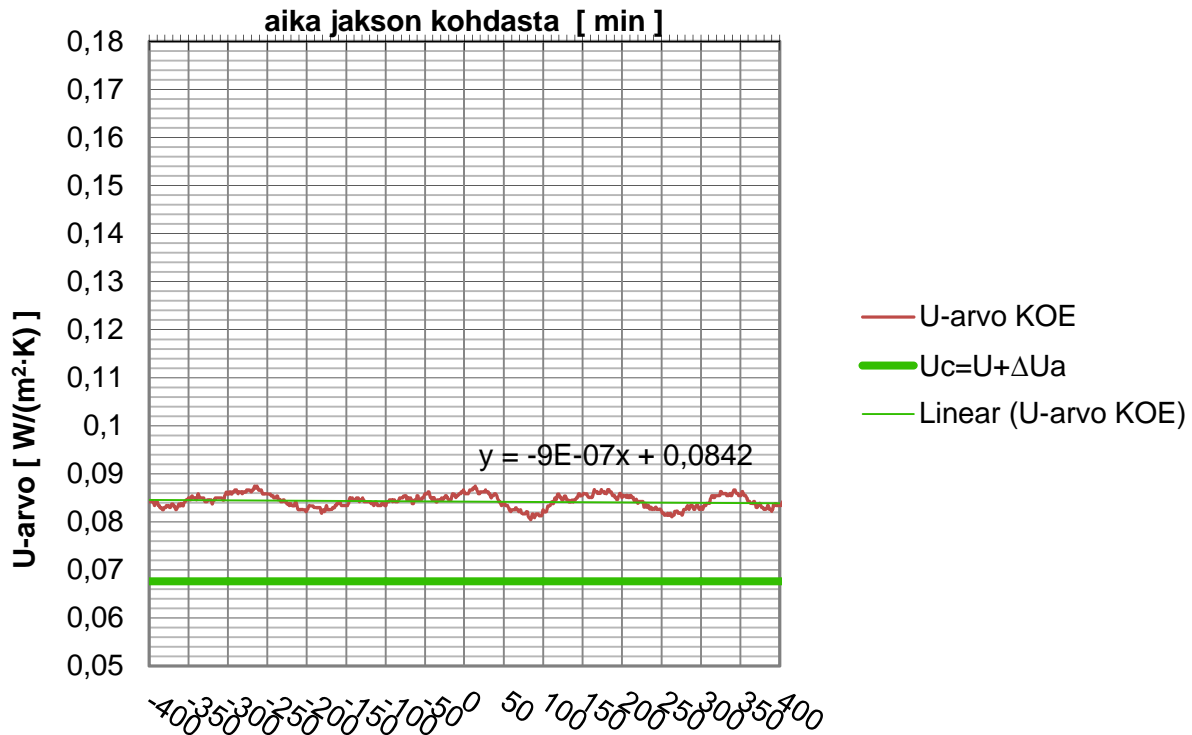
KOKONAISLÄMMITYSTEHO

KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO

$U_c = U + \Delta U$; $\Delta U = \Delta U_a$

LEVYPUH600T

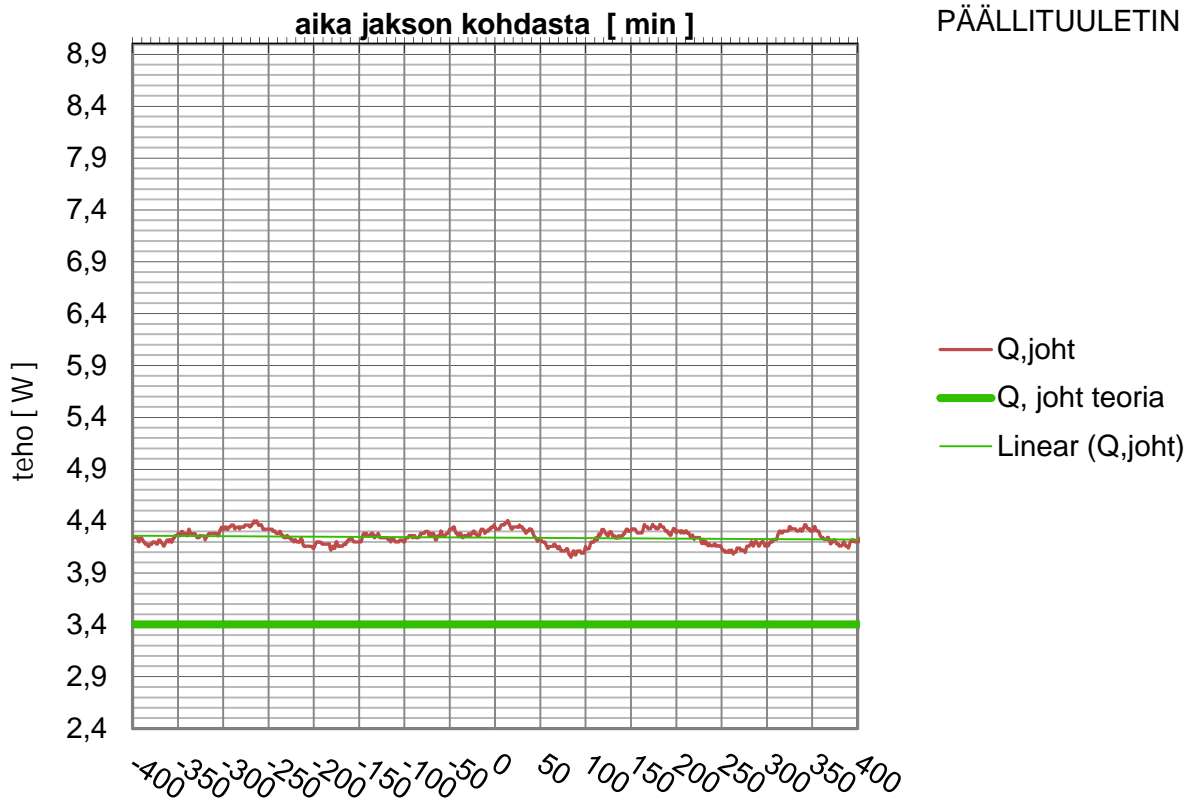
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN TEHO

LEVYPUH600T

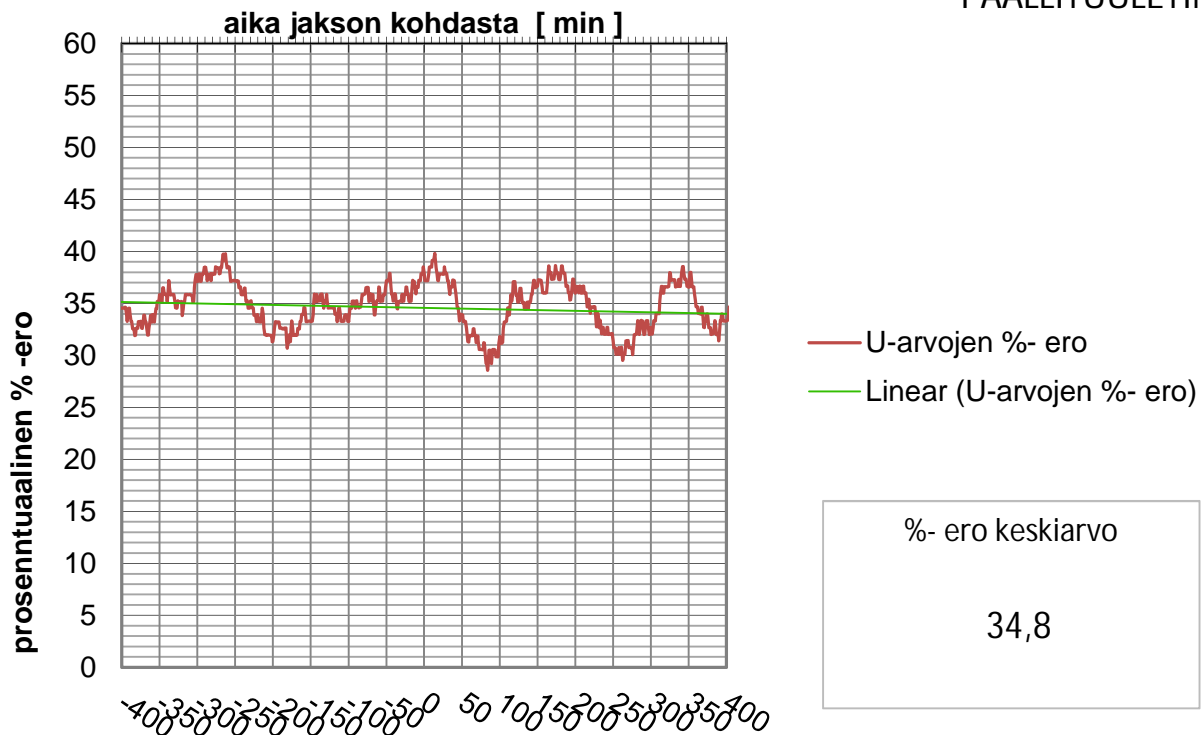
PÄÄLLITUULETIN



KOKEELLINEN JA TEOREETTINEN U-ARVO prosentuaalinen ero, $U_c=U$

LEVYPUH600T

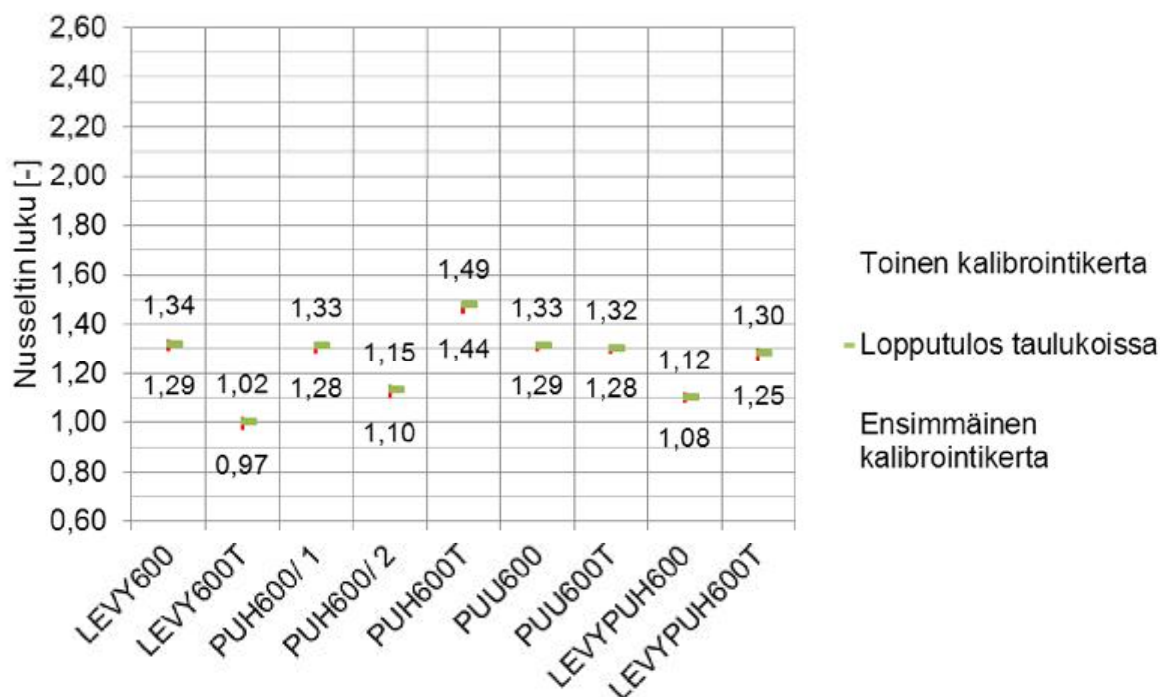
PÄÄLLITUULETIN



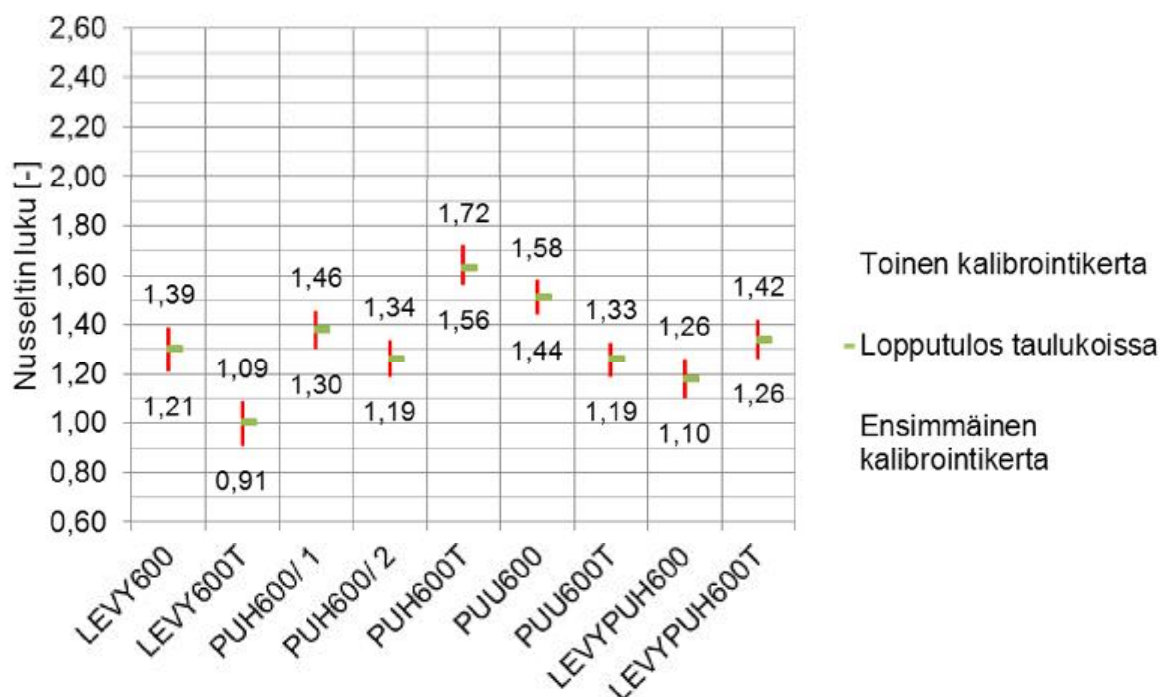
Nusseltin luku

1,39

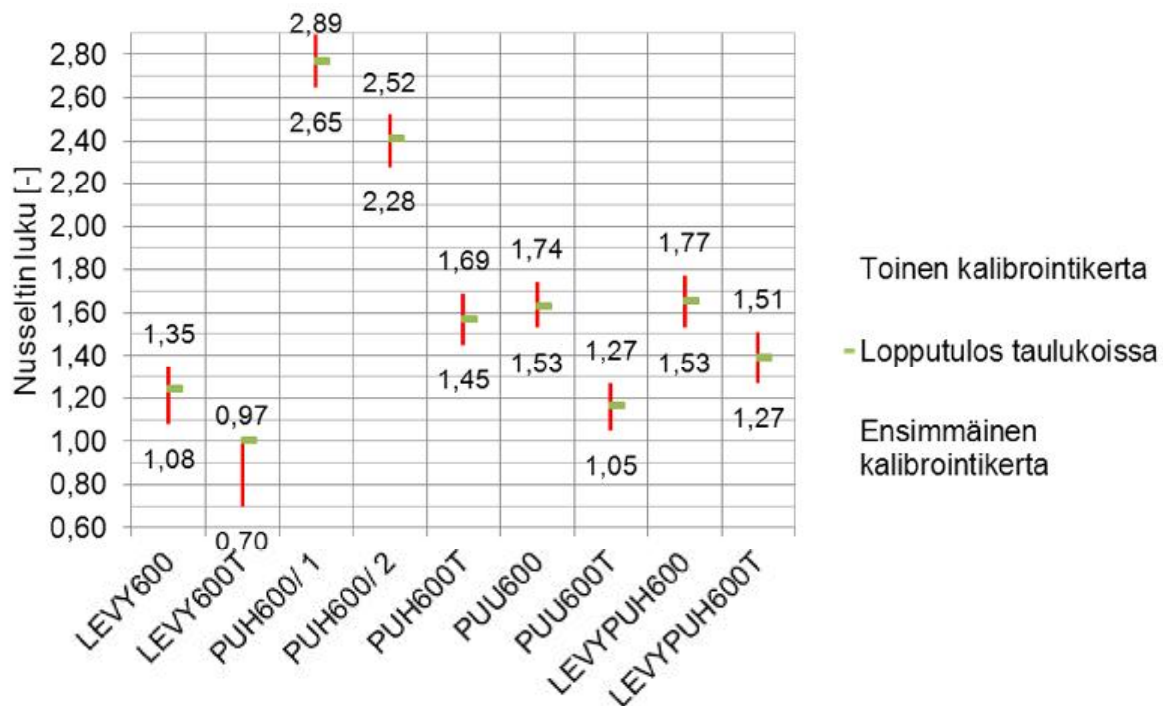
Nusseltin luku on laskettu kokeessa tutkittavan lämmöneristeen läpi kulkeutuvan lämpöenergian suhteena lämmöneristeen läpi lasketun johtumalla tapahtuvan ideaalisen lämmönsiirtymisen teoreettiseen arvoon. Nusseltin lukua määritäessä kokeen lämpötilaero on määritetty pintalämpötilaerona.



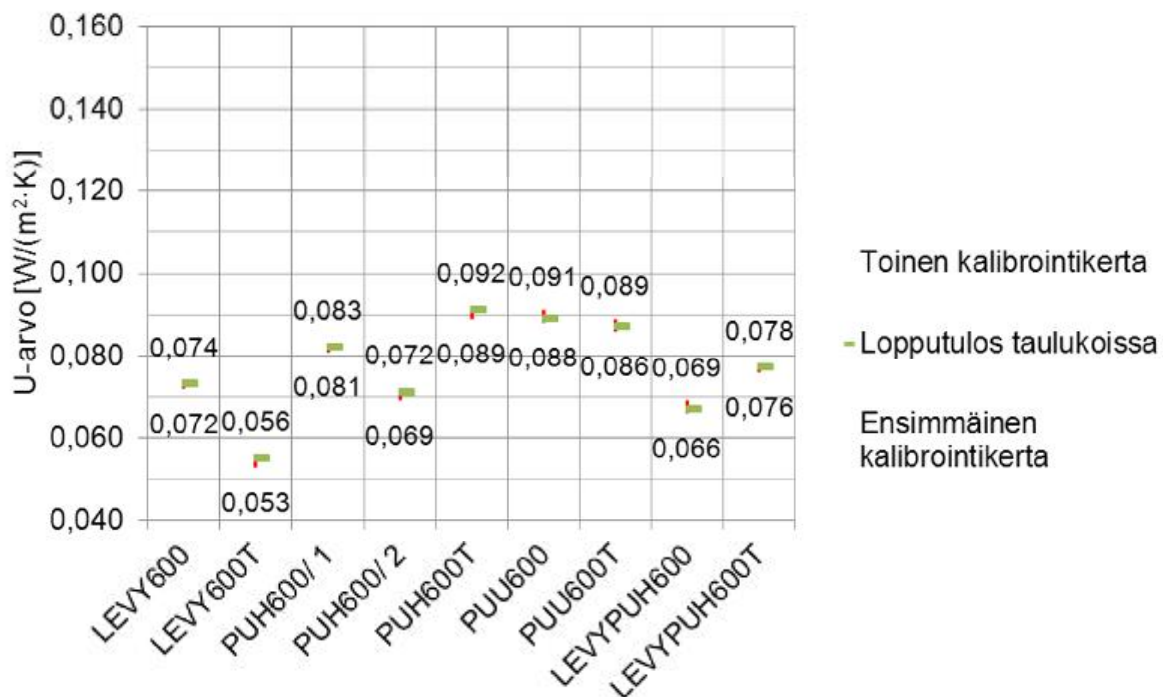
Kuva 1. Tutkimuksen 2. osan 1. vaiheessa (tuulettamaton tilanne) kahden kalibrointikerran mittaustuloksista johdetut Nu-luvut sekä taulukoitu lopputulos. Keskimääräinen epätarkkuus on +/- 1,9 %. Kokeen PUH600/ 1 koetulosta ei ole huomioitu epätarkkuuden laskennassa.



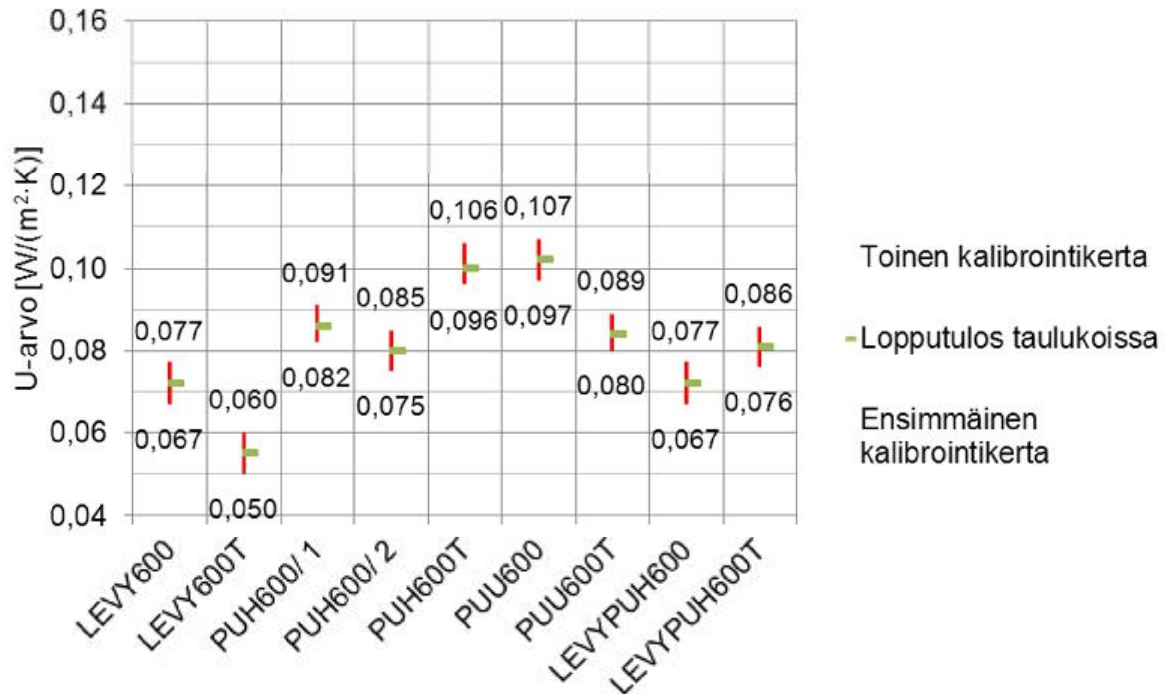
Kuva 2. Tutkimuksen 2. osan 2. vaiheessa (sivupuhallin) kahden kalibrointikerran mittaustuloksista johdetut Nu-luvut sekä taulukoitu lopputulos. Keskimääräinen epätarkkuus on +/- 6,2 %. Kokeen PUH600/ 1 koetulosta ei ole huomioitu epätarkkuuden laskennassa.



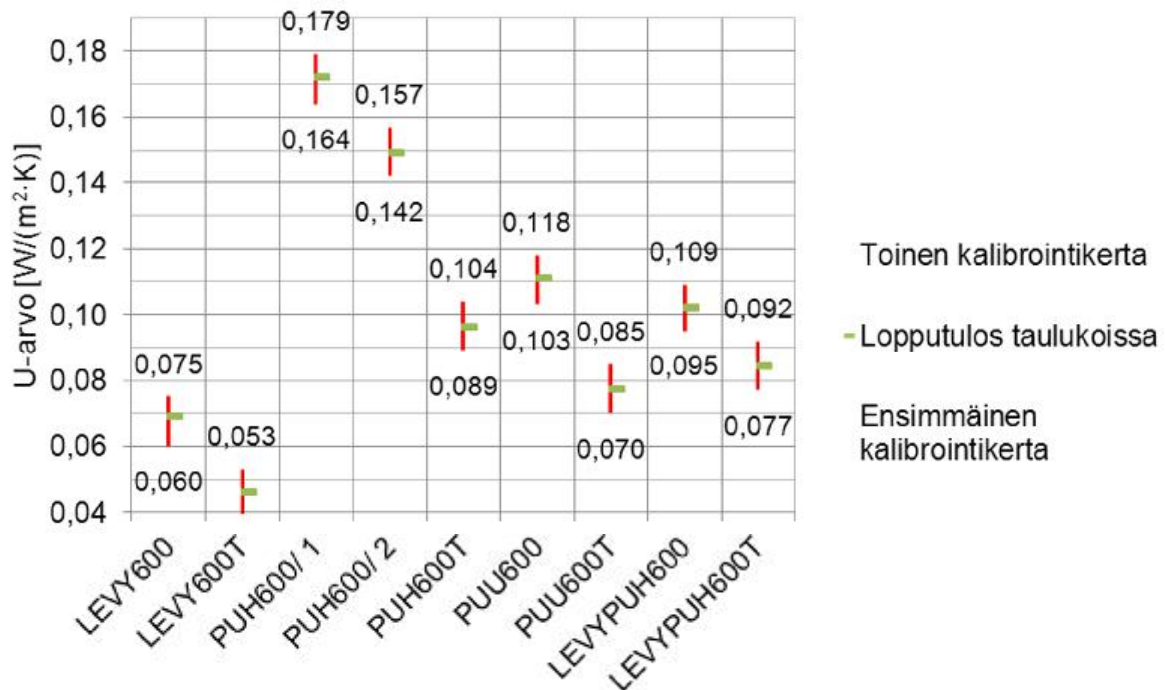
Kuva 3. Tutkimuksen 2. osan 3. vaiheessa (päällipuhallin) kahden kalibrointikerran mittaustuloksista johdetut Nu-luvut sekä taulukoitu lopputulos. Keskimääräinen epätarkkuus on +/- 8,6 %. Kokeen PUH600/ 1 koetulosta ei ole huomioitu epätarkkuuden laskennassa.



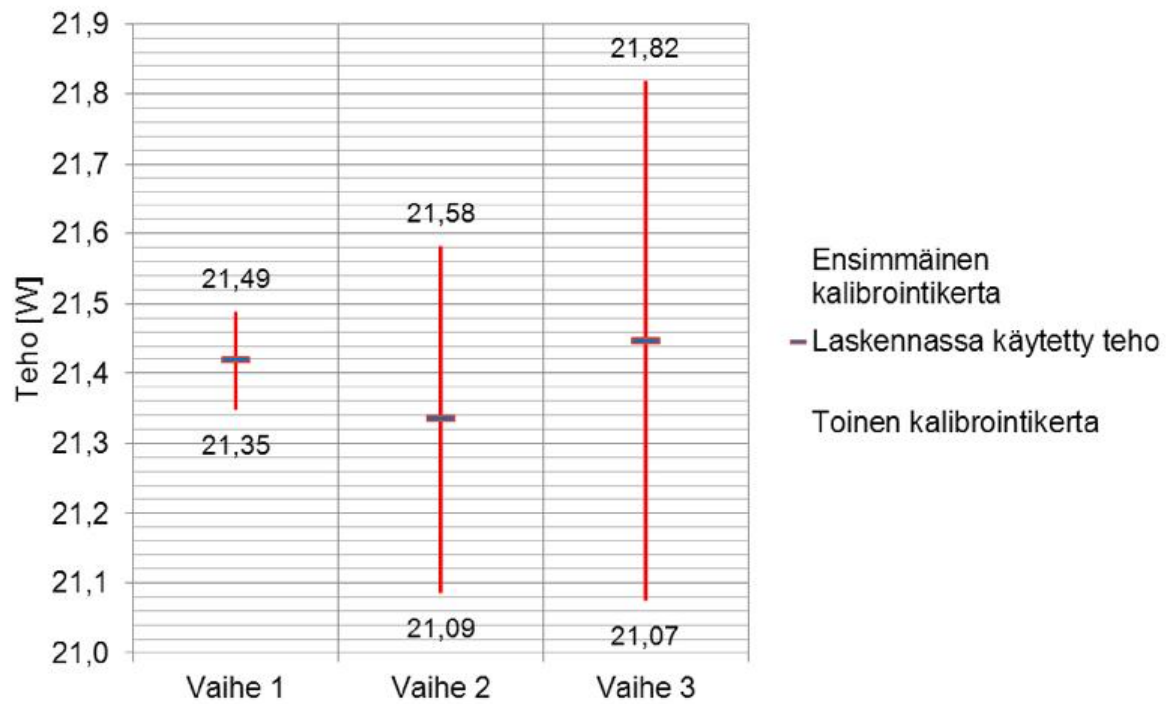
Kuva 4. Tutkimuksen 2. osan 1. vaiheessa (tuulettamaton tilanne) kahden kalibrointikerran mittaustuloksista johdetut U-arvot sekä taulukoitu lopputulos. Keskimääräinen epätarkkuus on +/- 1,9 %. Kokeen PUH600/ 1 koetulosta ei ole huomioitu epätarkkuuden laskennassa.



Kuva 5. Tutkimuksen 2. osan 2. vaiheessa (sivupuhallin) kahden kalibrointikerran mittaustuloksista johdetut U- arvot sekä taulukoitu lopputulos. Keskimääräinen epätarkkuus on +/- 6,3 %. Kokeen PUH600/ 1 koetulosta ei ole huomioitu epätarkkuuden laskennassa.



Kuva 6. Tutkimuksen 2. osan 3. vaiheessa (päällipuhallin) kahden kalibrointikerran mittaustuloksista johdetut U- arvot sekä taulukoitu lopputulos. Keskimääräinen epätarkkuus on +/- 8,9 %. Kokeen PUH600/ 1 koetulosta ei ole huomioitu epätarkkuuden laskennassa.



Kuva 7. Kalibroinnin perusteella määritelty häviölämpöteho, $Q_{\text{HÄVIÖ}}$ [W]. Kokonaistehosta on vähennetty teoreettinen kalibroitieristeen läpi johtunut teoreettinen lämmitysteho. Keskimääräinen häviötehon epätarkkuus tutkimuksen 2. osan vaiheessa 1 (tuulettamaton tilanne) on +/- 0,3 %, vaiheessa 2 (sivupuhallin) +/- 1,2 % ja vaiheessa 3 (päällipuhallin) +/- 1,7 %.